Физические величины

СПРАВОЧНИК

Под редакцией
И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова

МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1991

УДК 53.081 (035.5)

Физические величины: Справочнйк/А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под. ред. И. С. Григорьева, Е. 3. Мейлихова. — М.; Энергоатол1издат, 1991. — 1232 с. — ISBN 5-283-04013-5

Приведены основные физические характеристики веществ, наиболее часто используемых в практике научных исследований и в технике. Представлены следующие разделы: механика, термодинамика, кинетические явления, электричество и магнетизм, оптика и лазеры, ядерная физика, астрономия и геофизика. Все величины приведены в СИ. Таблицы и графики сопровождаются краткими пояснениями и определениями соответствующих величин.

Для научных работников и инженеров различных специальностей.

Авторы: А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский, М. Е. Бродов, М. В. Быстрое, Б. В. Виноградов, Л. И. Винокурова, Э. Б. Гельман, А. П. Геппе, И. С. Григорьев, К. Г. Гуртовой, В. С. Егоров, А. В. Елецкий, Л. К. Зарембо, В. Ю. Иванов, В. Л Ивашинцева, В. В. Игнатьев, Р. М. Имамов, А. В. Инюшкин, Н. В. Кадобнова, И. И. Карасик, К. А. Кикоин, В. А. Криворучко, В. М. Кулаков, С. Д. Лазарев, Т. М. Лифшиц, Ю. Э. Любарский, С. В. Марин, И. А. Маслов, Е. 3. Мейлихов, А. И. Мигачев, С. А. Миронов, А. Л. Мусатов. Ю. П. Никитин, Л. А. Новицкий, А. И. Обухов, В. И. Ожогин, Р. В. Писарев, Ю. В. Писаревский, В. С. Птускин, А. А. Радциг, В. П. Рудаков, Б. Д. Сумм, Р. А. Сюняев, М. Н. Хлопкин, И. Н. Хлюстиков, В. М. Черепанов, А. Г. Чертов, В. Г. Шапиро, В. М. Шустряков, С. С. Якимов, В. П. Яновский.

Рецензенты: А. А. Александров (гл. 13), Г. Н. Афанасьев (гл. 35, 38), О. А. Барсуков (гл. 43), Э. А. Вельская (гл. 15), Ю. П Гайдуков гл. 30), А. А. Горбатов (гл. 7), Ю. Н. Денисов (гл. 34), И. С. Желудев гл. 2), Е. А. Иванов (гл. 36), С. С. Иванов (гл. 44), Д. Н. Каган (гл. 9), Л. Д. Козлов (гл. 1), Н. С. Костюков (гл. 23), С. А. Ламзин (гл. 45), Р. 3. Левитин (гл. 26, 27, 29), Ю. В. Мамонов (гл. 12), Б. А. Мамырин (гл. 1), В. П. Машкович (гл. 1), Н. М. Михин (гл. 6), А. Г. Мозговой (гл. 11), М. П. Орлова (гл. 8), В. В. Пашкевич (гл. 37, 40). В. Э. Пелецкий (гл. 21. 24, 31), В. А. Петухов (гл. 10), А. Н. Подмарьков (гл. 22), А. В. Пустогаров (гл. 25), В. В. Рощупкин (гл. 5), У. И. Сафронова (гл. 32), С. Н. Сковородько (гл. 4, 14), В. И. Соколов (гл. 28), Е. А. Ступицкий (гл. 18, 19), Л. П. Филиппов (гл. 16, 17. 20). В. И. Фурман (гл. 39), В. И. Цовбун (гл. 41, 42), М. В. Четкин (гл. 33), М. Ф. Шешенев (гл. 3)

Справочное издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Редакторы 3. Д. Андреенко, О. П. Дунаева, Е. В. Сатарова
Художественные редакторы А. Т. Кирьянов, А. А. Белоус
Технический редактор В. В. Ханаева
Корректоры И. А. Володяева, М. Г. Гулипа, 3. Б. Драновская
ИВ № 2264

Сдано в набор 28.04.87. Подписано в печать 21.02.89. Т-04136. Формат 84x1087i6. Бумага имп. кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 129.36. Усл. кр.-отт. 129.78. Уч.-изд. л. 163.81. Тираж 50 000 экз. Заказ 2159. Цена 12 р. 00 к.

Энергоатомиздат. 113114. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская Ордена Трудового Красного Знамени типография М 2 Госкомпечати

~~0 5 1 (0 1) - 9 1~~ ^^Б-8-27-90

© Авторы, 1991

ISBN 5-283-04013-5

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

Глава 1. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. *А. Г. Чертов*

1.1. Общие положения
1.2. Единицы Международной системы . . .
Основные величины и единицы СИ
Дополнительные единицы
Производные единицы СИ по разделам физики
Пространство и время. Периодические и связанные с ними явления. Механика. Теплота. Электричество и магнетизм. Оптика. Акустика. Физическая химия и молекулярная физика. Атомная и ядерная физика.
1.3. Рекомендуемые величины и единицы ионизирующих излучений
Величины и единицы, характеризующие ионизирующее излучение и его поле. Величины и единицы, характеризующие взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Дозиметрические величины и единицы. Величины и единицы, характеризующие источники ионизирующих излучений. О поридке внедрения ГОСТ 8.417—81 в области измерения ионизирующих излучений
1.4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования
1.5. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ . .
1.6. Перечень некоторых относительных и логарифмических величин и их единиц . . .
1.7 Единицы, временно допускаемые к применению
1.8 Соотношения некоторых внесистемных единиц с единицами СИ
1.9. Соотношения между единицами электромагнитных величин в системах СГС и СИ
1.10. Соотношения внесистемных единиц радиоактивности и ионизирующих излучений с единицами СИ
1.11 Соотношение системы атомных единиц Хартри е — Ше—Ь и системы релятивистских единиц с — т е = Ь с единицами СИ
1.12. Рекомендуемые кратные и дольные единицы от единиц СИ и от единиц, применяемых наравне с единицами СИ.
1.13. Соотношения между единицами физических величин
Длина. Площадь. Объем. Плоский угол. Телесный угол. Время. Температура. Скорость. Ускорение. Угловая скорость. Частота вращения. Масса. Плотность. Линейная плотность. Сила Давление Импульс (количество движения). Момент силы. Момент импульса (момент количества движения). Наппяжение (механическое). Работа, энергия. Мощность Динамическая вязкость. Кинематическая вязкость. Объемный расход. Количество теплоты (теплота). Удельная теплоемкость. Молярная теплоемкость. Теплопроводность (коэффициент теплопроводности). Электрический заряд. Напряженность электрического поля. Электрический момент. Плотность тока. Удельное электрическое сопротивление. Удельная электрическая проводимость. Магнитная индукция. Магнитный поток. Напряженность магнитного поля. Магнитодвижущая сила. Магнитный момент. Яркость. Поглощенная доза. Эквивалентная доза. Активность нуклида в радиоактивном источнике. Экспозиционная доза рентгеновского и ^-излучений . . . .
1.14. Фундаментальные физические постоянные .
Список литературы

Глава 2. СИММЕТРИИНОЕ И ТЕНЗОРНОЕ ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ. *Ю. В. Писаревский*

2.1. Симметрия кристаллов
Точечные группы. Кристаллографические классы. Пространственные группы симметрии. Магнитная симметрия Предельные группы. Кристаллографическая система координат .
2.2. Физические свойства кристаллов . . . .
Кристаллографическая система координат . Симметрия физических свойств. Матричное описание физических свойств кристаллов. Влияние внешнего воздействия
Список литературы

Глава 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ. *Н. В. Кадобнова. А. М. Братковский*

3.1. Общие сведения
3.2. Механические свойства при температуре 20°С
Металлы. Стали. Алюминиевые сплавы Титановые сплавы. Магниевые сплавы. Медные сплавы и сплавы на основе олова и свинца. Жаропрочные сплавы и сплавы на основе тугоплавких металлов. Композиционные материалы. Пластмассы, металлокерамика и другие материалы. Минералы и волокна . . .
3.3. Механические свойства при низких и высоких температурах
3.4. Выносливость материалов . . . . . .
3.5. Характеристики разрушения.
3.6. Механические свойства аморфных металлов и сплавов
Список литературы

Глава 4. СЖИМАЕМОСТЬ. *Б. В. Виноградов*

4.1. Введение
4.2. Сжимаемость твердых тел
4.3. Сжимаемость жидкостей и газов . . . .
Список литературы

Глава 5. ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ. ***А. П. Бабичев*** 98

5.1. Введение 98
5.2. Элементы 99
5.3. Неорганические вещества 100
5.4. Органические вещества . . . . . Ш
5.5. Сплавы, минералы, дерево и другие твердые вещества
5.6. Пластмассы . . . . . ^^
5.7. Жидкости 123
5.8. Ртуть при различной температуре и атмосферном давлении
5.9. Дистиллированная вода при различной температуре и атмосферном давлении . . 24
Список литературы . . . . . 1'"*

Глава 6. ТРЕНИЕ. ***И. И. Карает*** 124

6.1. Введение 124
6.2. Адгезионная связь при трении скольжения 126
6.3. Трение покоя 127
6.4. Трение скольжения без смазывания . . . 128
6.5. Трение смазанных поверхностей и твердосмазочных покрытий 130
6.6. Трение по льду и снегу 131
6 7. Трение в вакууме 131
6 8. Трение качения 132
Список литературы 132

Глава 7. АКУСТИКА. Л. ***К. Зарембо*** . . . 133

7.1. Введение 133
7.2. Распространение звука в газах и парах . 134
Скорость звука. Затухание звука
7.3. Распространение звука в жидкостях . . . 137
Скорость звука. Нелинейные механические характеристики жидкостей. Поглощение звука в жидкостях
7.4. Распространение звука в твердых телах . Ш
Скорость звука. Затухание звука. 156
Список литературы 166

Глава 8. ТЕРМОМЕТРИЯ. Л. ***В. Инюшкин*** . 172

8.1.Общие сведения 172
8.2. Температурные шкалы 172
8.3. Жидкостно-стеклянные термометры . . . 178
8.4. Термометры сопротивления 179
8.5. Термоэлектрические термометры 179
8.6. Конденсационные термометры 187
8.7. Оптическая пирометрия 191
8.8. Термоиндикаторы и кристаллические измерители максимальной температуры . . 194
Список литературы 195

Глава 9. ТЕПЛОЕМКОСТЬ. ***М. Н. Хлопкин*** . 197

9.1. Общие сведения 197
Определение и единицы теплоемкости. Теплоемкость твердых тел. Теплоемкость разряженных газов. Теплоемкость плотных газов и жидкостей. Теплоемкость сплавов, растворов и смесей. Теплоемкость вблизи фазовых переходов. Справочная литература по теплоемкости 198
9.2. Теплоемкость элементов 198
9.3. Теплоемкость неорганических соединений . 207
9.4. Теплоемкость органических соединений . 214
9.5. Теплоемкость растворов, смесей, сплавов и технических материалов 217
Список литературы 220

Глава 10. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ ***Э. Б. Гельман*** . .

10.1. Введение
10.2. Температурные коэффициенты линейного расширения твердых тел
Элементы в кристаллическом состоянии. Индивидуальные соединении. Неорганические соединения при температуре выше 1000 К Кварцевые и оптические стекла. Технические стекла. Ситаллы. Чугуны. Стали, хром-никелевые, хром-кобальтовые и другие сплавы Цветные металлы и сплавы. Алюминиевые сплавы. Пластмассы. Строительные материалы
10.3. Температурные коэффициенты объемного расширения жидкостей и газов . . .
Элементы и неорганические соединения. Органические соединения
Список литературы

Глава 11. ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ. В. ***В. Игнатьев, В. А. Криворучко А. И. Мигачев***

11.1. Пары воды
11.2. Пары неорганических веществ . . ,
11.3. Пары органических веществ . . .
11.4. Коэффициент разделения изотопных молекул
Список литературы

Глава 12. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ ***Э. Б. Гельман***

12.1. Введение
12.2. Плавление и кипение при постоинном лении
Элементы. Неорганические соединения Органические соединения. Полупроводниковые и оптические материалы. Высокотемпературные материалы. Стали и промышленные сплавы. Двухкомпонентные сплавы. Легкоплавкие сплавы. Стекла. Полимерные материалы. Топливо, масло, гидравлические жидкости. Хладоны и теплоносители
12.3. Плавление и кипение в зависимости о-давления
Элементы. Неорганические соединения. Органические соединения
Список литературы

Глава 13. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ ***Э. Б. Гельман***

13.1. Уравнение состояния твердого тела
Постоянная Грюнейзена и параметры уравнения состояния Миг — Грюнейзена некоторы> веществ
13.2. Уравнение состояния газа
Второй вириальный коэффициент. Третий вириальный коэффициент
13.3. Критические параметры веществ . .
Простые вещества. Неорганические соединения. Органические соединения.
Список литературы

Глава 14. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ. ***Б. Д. Сумм*** . . . .

14.1. Введение
14.2. Сжиженные газы . . .
14.3. Вода
14.4. Органические вещества

14.5. Жидкие металлы 335
14.6. Расплавы солей 336
И.7. Твердые металлы 337
Список литературы 337

Глава 15 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ. *А. В. Инюшкин* 337

J5.1. Общие сведения 337
15.2. Теплопроводность простейших химических веществ 338
15.3. Теплопроводность газов и паров 339
15.4. Теплопроводность жидкостей 339
15.5. Теплопроводность твердых тел 339
Список литературы 363

Глава 16. ВЯЗКОСТЬ. *А. В. Елецкий* . . . 364

16.1. Введение 364
16.2. Вязкость газов 364
16.3. Вязкость жидкостей 37G
Список литературы 374

Глава 17. ДИФФУЗИЯ. *А. В. Елецкий* . . 375

17.1. Введение 375
17.2. Диффузия атомов и молекул в газах , . 375
17.3. Диффузия в жидкостях 376
17.4. Диффузия в твердых веществах 378
Список литературы 390

Глава 18. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ. Л. В. *Елецкий* 391

18.1. Колебательная релаксация молекул в газах 391
!8.2. Рассеяние электронов на атомах и молекулах 393
18.3. Процессы ионизации с участием возбужденных атомов 395
18.4. Процессы резонансной перезарядки . . 395
18.5. Ионно-молекулярные реакции 396
18.6. Процессы нейтрализации заряженных частиц в плазме 398
18.7. Процессы образования и разрушения отрицательных ионов 399
18.8. Процессы тушения возбужденных атомов и молекул при столкновениях с тяжелыми частицами
18.9. Фотоионизация и фоторекомбинация . . 409
Список литературы 410

Глава 19. ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ и МОЛЕКУЛ. *А. А. Радциг. В. М. Шустряков* 411

19.1. Введение 411
19.2. Потенциал ионизации атомных и молекулярных частиц 411
19.3. Энергия связи электронов во внутренних оболочках атомов 420
19.4. Энергия сродства атомов и молекул к электрону 420
19.5. Энергия сродства атомов и молекул к протону 420
19.6. Эффективные сечения ионизации атомов и молекул электронами 422
Список литературы 429

Глава 20. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ. *А. В. Елецкий* 430

20.1. Диффузия и подвижность заряженных частиц в слабоионизованной плазме . . . 430
20.2. Вязкость слабоионизованной плазмы . . . 436
20.3. Теплопроводность ионизованного газа . . 436
Список литературы 437

Глава 21. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. В. С *Егоров, И. Н. Хлюстиков*

21.1. Введение 437
21.2. Чистые металлы 438
21.3. Влияние всестороннего сжатия на сопротивление металлов 440
21.4. Электрические свойства некоторых металлов и **сплавов** 444
21.5. Сверхпроводники 448
Список литературы 453

Глава 22. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ. С. *Д. Лазарев. Е. З. Мейлихов*

22.1. Введение 454
22.2. Элементарные полупроводники 455
22.2.1. Кремний и германий . . . 455
22.3. Полупроводниковые соединения 469
22.3.1. Соединения типа Л1В1—Л'Вуи 469
22.3.2. Соединения типа ЛПБ1У_Л11ВУ11 . . 469
22.3.3 Соединения типа Лш Biv_AiiiBvii . 500
22.3.4. Соединения типа . . 517
22.3.5. Соединения типа ЛУВУ—ЛУВУШ . . 530
22.3.6. Соединения типа ЛУ1В1у_ЛУ1ВУ1 . . 535
22.3.7. Соединения типа ЛУИВШ-ЛУПВУ! . 537
22.3.8. Соединения типа ЛШВУ-ЛШВУ! . . . 537
Список литературы 538

Глава 23. ДИЭЛЕКТРИКИ. Л *П. Гете* .

23.1. Общие сведения 543
23.2. Газообразные диэлектрики 545
23.3. Жидкие диэлектрики 548
23.4. Твердые диэлектрики 549
23.5. Активные диэлектрики 557
Список литературы 559

Глава 24. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ. *Н.* Л. *Бабушкина* 559

Список литературы 566

Глава 25. ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЭМИССИЯ. *Т. М. Лифшиц.* Л. *Л. Мусатов*

25.1. Вводные замечания. 567
25.2. Работа выхода 567
25.3. Термоэлектронная эмиссия . . . 570
25.4. Фотоэлектронная эмиссия . . . 574
25.5. Вторичная электронная эмиссия 582
25.6. Полевая электронная эмиссия 587
25.7. Ионная и ионно-электронная эмиссия
Список литературы

Глава 26. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА И ПАРАМАГНЕТИКОВ. *В. Ю. Иванов Л. И. Винокурова*

Список литературы

Глава 27. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ *К г. гуртовой*

27.1. Вводные замечания 613
27 2. Элементы 614
27.3. Сплавы 623
27.4. Металлические магнитные материалы 636
Список литературы 646

Глава 28. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ. *В. И. Ожогин, В. Г. Шапиро* 648
28.1. Вводные замечания 648
28.2. Основные магнитные свойства легкоосных антиферромагнетиков (на примере MnFj) . 648
28.3. Основные магнитные свойства легкоплоскостных антиферромагнетиков (на примере MnCOз, CoCOз) 650
28.4. Мета магнетики 650
28.5. Антиферромагнетики со взаимодействием Дзялошн некого 651
28.6. Пьезомагнетики и магнитоэлектрики . . 651
28.7. Акустомагнетики. 652
28.8. Органические сверхпроводники 652
28.9. Некоторые свойства антиферромагнетиков 652
Список литературы 652
Глава 29. ФЕРРИТЫ И ДРУГИЕ МАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ. *М. В. Быстрое, В. Л. Ивашинцева, С. А. Миронов, Р. В. Писарев* 705
29.1. Общие сведения 709
29.2. Ферриты-шпинели 709
А. Простые ферриты. 709
Б. Смешанные ферриты 710
29.3. Ферриты со структурой граната 710
29.4. Гексагональные ферриты 716
29.5. Некоторые ферро- и ферримагнитные диэлектрики 716
Список литературы 726
Глава 30. ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМО.МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. *И. А Бабушкина* 732
30.1. Общие сведения 732
30.2. Топология поверхности Ферми металлов . 733
30.3. Влияние магнитного поля на электрическое сопротивление металлов 733
30.4. Кой>фиЦиенты Холла металлов 736
30.5. Коэффициенты Холла ферромагнетиков и редкоземельных металлов 739
30.6. Термомагнитные коэффициенты металлов . 739
Список литературы 744
Глава 31 ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ. *Л.* Л. *Новицкий* 755
31.1. Общие сведения 760
31.2. Оптические сгекла 763
31.3. Поляризационные, магнитооптические и электрооптические материалы. 764
31.4. Оптические кристаллы и оптическая керамика 766
31.5. Лакокрасочные материалы 770
31.6. Металлы и сплавы 770
31.7. Графитовые материалы 770
31.8. Полимерные материалы 770
31.9. Строительные материалы 770
31.10. Окислы, бориды, карбиды и нитриды тугоплавких металлов 770
31.11. Земные покровы и природные минералы . 770
31.12. Лунные грунты 770
31.13. Жидкости, отвержденные вещества . . 770
31.14. Газы и плазма 770
Список литературы 770
Глава 32. СПЕКТРЫ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ. *А. А. Радциг* 777
32.1. Введение . . 778
32.2. Оптические спектры атомов. 779
32.3. Тонкая структура уровней энергии атомов 785
32.4. Сверхтонкая структура уровней энергии атомов 785
32.5. Изотопическая структура атомных спект 786
32.6. Спектры двухатомных молекул 789
Список литературы 790
Глава 33. ЭЛЕКТРО-, МАГНИТО-, ПЬЕЗО ОПТИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. *М. Е. Бродов, В. П. Яновскии* 791
33.1. Общие сведения 793
33.2. Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) 794
33.3. Магнитное вращение плоскости поляризации (эффект Фарадея) 794
33.4. Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра) 794
33.5. Эффект фотоупругости 794
33.6. Оптическая активность 794
33.7. Генерация второй гармоники в кристалла} Показатели преломления нелинейных кристаллов 794
33.8. Вынужденное рассеяние света . . . 794
Список литературы 794
Глава 34. ЛАЗЕРЫ. *М. Е. Бродов, В. П. Янов* 794
34.1. Вводные замечания 794
34.2. Газовые лазеры 794
34.3. Лазеры на примесных кристаллах 794
34.4. Характеристики промышленных неодимовых лазерных стекол 794
34.5. Полупроводниковые лазеры . . . 794
34.6. Жидкостные лазеры с редкоземельными активаторами 794
34.7. Лазеры на красителях 794
34.8. Твердотельные лазеры на центрах окраски 794
Список литературы 794
Глава 35. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ Р. *М. Имамов* 794
35.1. Получение и свойства рентгеновского излучения 794
35.2. Характеристический спектр рентгеновского излучения 794
35.3. Длины волн основных линий и краев поглощения рентгеновского излучения . . 794
35.4. Ширина линий рентгеновского излучения 794
35.5. Относительные интенсивности линий . 794
35.6. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом 794
35.7. Вторичные спектры и эффекты химической связи в рентгеновской спектроскопии 794
Список литературы 794
Глава 36. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ *Ю. П. Никитин* 794
36.1. Вводные замечания 794
36.2. Классификация взаимодействий и основные группы элементарных частиц . . 794
36.3. Законы сохранения и внутренние симметрии 794
36.4. Кварковая структура адронов . . . 794
36.5. Электрослабое и сильное взаимодействия 794
36.6. Элементарные частицы, стабильные по отношению к распадам по сильному взаимодействию 794
36.7. Мезонные резонансы 794
36.8. Барионные резонансы 794

36.9. Магнитные моменты элементарных частиц
36.10. Параметры распа.дов элементарных частиц
Список литературы

Глава 37. ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА НУКЛИДОВ. *В. М Кулаков*

37.1. Таблица нуклидов
37.2. Эталонные энергии Y-чзлучения, а-частиц и конверсионных электронов
37.3. Квантовые характеристики ядер
37.4. Радиоактивные ряды
Список литературы

Глава 38. МЁССБАУЭРОВСКИЕ ЯДРА. *С. С. Якимов, В М Черепанов*

38.1. Общие сведения
38.2. Характеристики мёссбауэровских ядер
38.3. Параметры мёссбауэровских спектров
38.4. Изомерный сдвиг
Список литературы

Глава 39. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. *В. Л. Рудаков*

39.1. Вводные замечания
39.2. Сечение резерфордовского рассеяния
39.3. Энергия ядерной реакции
39.4. Порог ядерной реакции
39.5. Кулоновский барьер
39.6. Кинематика ядерных реакций
Список литературы

Глава 40. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР. *А. И. Обухов, И. С. Григорьев*

40.1. Вводные замечания
40.2. Барьеры деления ядер
40.3. Спонтанное деление
40.4. Сечения деления ядер
40.5. Энергия, выделяемая при делении
40.6. Продукты деления ядер
40.7. Нейтроны деления
40.8. Мгновенное \'-излучение
40.9. Запаздывающее излучение продуктов деления
Список литературы

Глава 41. ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО. *С. В. Марин*

41.1. Общие замечания
41.2. Основные характеристики нейтрона
41.3. Нейтронные сечения
41.4. Механизм ядерных реакций с участием нейтронов
41.5. Сечения ядерных реакций для нейтронов тепловой энергии
41.6. Графики зависимости полных сечений от энергии
41.7. Резонансные интегралы
41.8. Ядерная реакция *(n, 2n)*
41.9. Ядерная реакция (и, р)
41.10 Ядерная реакция (и, о.)
41.11. Ядерная реакция *(n, t)*
41.12. Активационные детекторы
41.13. Замедление нейтронов
41.14. Диффузия нейтронов
Список литературы

Глава 42. ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО *В. П. Рудаков*

42.1. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество
42.2. Многократное рассеяние при прохождеии! заряженных частиц через вещество
42.3. Прохождение электронов через вещество
42.4. Прохождение гамма-излучения через вещество
Список литературы

Глава 43. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ. *В. С. Птускин*

43.1. Источники космических лучей
43.2. Галактические космические лучи
43.3. Модуляция галактических космических лучей в межпланетном пространстве
43.4. Солнечные космические лучи
43.5. Геомагнитные эффекты
43.6. Космические лучи в атмосфере Земли
Список литературы

Гл; 44. ФИЗИКА ЗЕМЛИ. *И.* А. *Маслов*

44.1. Общие характеристики Земли
Фигура Земли
Строение Земли
44.2. Литосфера
Состав и свойства. Поле силы тяжести. Сейсмичность. Магнитное поле. Тепловое пол
44.3. Гидросфера
Мировой океан Состав и свойства вод. Физические свойства океанической воды и льда Физические свойства морского льда. Оптические свойства океанической воды. Радиоактивность океанической воды. Скорость звука океане
44.4. Атмосфера
Строение атмосферы. Радиационный балан атмосферы. Электрические явления в атмосфере
Список литературы

Глава 45. АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА. *Ю. Э. Любарский. Р. А. Сюняев*

45.1. Некоторые астрономические единицы постоянные
45.2. Солнце
45.3. Планеты и спутники, межпланетная среда
45.4. Звезды
45.5. Наша Галактика
45.6. Галактики и Вселенная
Список литературы

Глава 46. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ. *К.* Л. *Кикоин*

Список литературы

ПРЕДИСЛОВИЕ

Более 10 лет назад под редакцией академика И. К. Кикоина был издан универсальный справочник «Таблицы физических величин», который стал достаточно популярным среди специалистов различного ранга. Однако любой справочник при всех своих достоинствах со временем неизбежно устаревает. Не избежали этого и «Таблицы физических величин». Сначала казалось, что исправить их можно «косметическими» методами — устранением ошибок, небольшой корректировкой и дополнениями. Но с течением времени стало ясно, что необходима более глубокая, а в ряде случаев и коренная переработка материала с привлечением новых физических данных и с новым коллективом авторов. Так родилась идея издания нового универсального физического справочника. Однако воплотить ее в жизнь Иссак Константинович не успел: под его руководством была выработана лишь общая концепция справочника и намечен коллектив авторов. На протяжении работы, которую нам пришлось выполнять уже без него, мы неоднократно сталкивались с различного рода сложными ситуациями и трудностями (касающимися отбора материала, его подачи, сложностей общения с большим коллективом авторов и т. д.), решение которых оказалось возможным в значительной мере благодаря обращению к тем идеям и принципам, которые были выработаны в совместных обсуждениях с И. К. Кикоиным. Поэтому все возможные достоинства справочника должны быть связаны с его именем, в то время как за все недостатки целиком и полностью отвечаем мы.

При работе над таким универсальным физическим справочником, коим, по нашему мнению, должен был стать справочник «Физические величины», необходимо было ясно представить себе его будущих пользователей. Для нас это — специалисты различного уровня (студенты, аспиранты, инженеры, научные работники), испытывающие потребность в конкретной числовой информации, не относящейся к их узкой специализации. В соответствии с этим мы старались отобрать для справочника такой материал, который мог бы помочь пользователям в их повседневной работе, а форма его подачи давала бы возможность легко использовать такой материал неспециалистам. Поэтому мы сочли необходимым дать в каждой главе сводку основных понятий соответствующего раздела физики, привести единицы наиболее важных физических величин и, по возможности, дать ссылки на более специализированные издания. При отборе числовых данных мы ограничивались, как правило, наиболее надежными из них (хотя, справедливости ради, следует сказать, что критерии надежности по необходимости весьма субъективны и различны у разных авторов). Там, где это было возможно и удобно, данные представлены всегда в виде графиков и рисунков. Другая проблема, стоявшая пред нами, — избежать дублирования данных в различных главах. В противном случае объем справочника стал бы непомерно большим. Полнота охвата материала в справочнике и его тематическая разнородность привели к тому, что единообразия подачи материала выдержать по всем главам в полной мере не удалось. Не исключено, что эта задача вообще неразрешима.

Сначала у нас была мысль снабдить справочник «инструкцией для пользователей», которая помогала бы ориентироваться в материале. Однако в конце концов мы пришли к выводу, что принятая форма организации материала справочника достаточно проста и легко позволяет найти «ключ» к нему.

Количество недочетов различного рода обычно пропорционально объему печатного материала. Сознавая это, мы старались тщательно проверить весь материал. Не исключено, однако, что что-то выпало из нашего поля зрения. Мы будем чрезвычайно признательны тем читателям, которые укажут нам на недостатки и тем самым позволят исправить их при последующих издания.х.

И. С. Григорьев
Е. З. Мейлихов

ГЛАВА 1

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

А. Г. Чертов

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Единицы физических величин, допущенные к применению на территории СССР, их наименования, определения и обозначения установлены государственными стандартами:

«ГСИ: Единицы физических величин» ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78);

ГОСТ 15484—81 «Излучения ионизирующие и их измерения: Термины и определения», а также руководящими нормативными документами:

РД 50—160—79 «Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин»;

РД 50—454—84 «Методические указания: Внедрение и применение ГОСТ 8.417—81 «ГСИ: Единицы физических величин» в области ионизирующих излучений;

МИ 221—81 «Методика внедрения СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин» в области измерений давления, силы и теплофизических измерений».

В соответствии с перечисленными документами:

1. Подлежат обязательному применению единицы Международной системы единиц а также десятичные кратные и дольные от них.

2. Допускаются к применению без ограничения срока наравне с единицами СИ внесистемные единицы, указанные в табл. 1.5, а также их сочетания с единицами СИ и нашедшие широкое применение на практике десятичные кратные и дольные от них.

3. Без ограничения срока допускается применять относительные и логарифмические единицы (табл. 1.6), за исключением единицы непер (см. табл. 1.7), а также их сочетания с единицами СИ и нашедшие широкое применение на практике десятичные кратные и дольные от них.

4. Допускаются к применению временно внесистемные единицы, приведенные в табл. 1.7, до принятия по ним соответствующих международных решений

5. Единицы, приведенные в табл. 1.8, изымаются из обращения в сроки, предусмотренные программами мероприятий, разработанными в соответствии с РД 50—160—

6. Стандарт «ГСИ. Единицы физических величин. ГОСТ. 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78)» не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и при публикациях их результатов, если в них не рассматривают и не используют результаты измерений конкретных физических величин, а также на единицы величин, оцениваемых по условным шкалам *'.

*' Международная система единиц (международное сокращенное наименование SI, в русской транскрипции СИ) принята в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) и уточнена на последующих ГКМВ.

1.2. ЕДИНИЦЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ

Основные величины и единицы СИ

Длина *l* — величина, характеризующая протяженность, удаленность и перемещение тел или их частей вдоль заданной линии; dim единица — метр (m;

Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени 1/299 792 458 с.

Масса *m* — величина, определяющая инертные и гравитационные свойства материальных объектов; dim m=M, единица — килограмм (kg; кг).

Килограмм равен массе международного прототипа килограмма.

Время ***t*** — величина, характеризующая последовательную смену явлений и состояний материи, характеризующая длительность их бытия; dim /=T, единица — секунда (s; **с**).

Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Сила электрического тока ***I*** — скалярная величина, равная производной по времени от электрического заряда, переносимого носителями заряда сквозь рассматриваемую поверхность; dim /=1, единица — ампер (А, А).

Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечении, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную 2- !0-'Н.

Термодинамическая температура ***T*** — температура, отсчитываемая по термодинамической шкале температур

*' Под условными шкалами понимаются, например, шкалы твердости Роквелла и Виккерса, светочувствительности фотоматериалов.

dim — сокращение от английского слова dimension, что означает в переводе на русский язык «размерность».

В скобках даются международное и русское обозначения единицы.

от абсолютного нуля; dim T'=G, единица — кельвин (К; К).

Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.

Примечания:

1. Кроме температуры Кельвина (обозначение ***Т)*** допускается применять также температуру Цельсия (обозначение ***t),*** определяемую выражением ***t=T—Ta,*** где /0=273,15 К по определению. Температура Кельвина выражается в Кельвинах, температура Цельсия — в градусах Цельсия (обозначение международное и русское °С). По размеру градус Цельсия равен Кельвину (1 °С=1 К).

2. Интервал или разность температур Кельвина выражается в Кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в Кельвинах, так и в градусах Цельсия.

3. Кроме термодинамической шкалы может быть использована Международная практическая температурная шкала МПТШ-68, которая была рекомендована XIV Генеральной конференцией по мерам и весам. МПТШ-68 базируется на 11 основных и 27 дополнительных реперных точках отсчета (см. гл. 8 «Термометрия») и выбрана таким образом, чтобы температура, измеренная по этой шкале, была близка к термодинамической температуре и разности между ними находились в пределах современной погрешности измерений. Т68=^68+273,15 Индекс 68 может быть опущен, если это не приводит к недоразумениям.

Количество вещества ***n*** — величина, равная числу структурных элементов, содержащихся в теле (системе тел); climn=Af, единица — моль (mol; моль).

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

Сила света ***I*** — величина, равная отношению светового потока, распространяющегося от источника излучения в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла к этому телесному углу; dim /=/, единица — кандела (cd; кд).

Кандела *' равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540-10^ Гц, ***сила*** излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.

Примечание. Единство световых измерений обеспечивается в соответствии с ГОСТ 8.023—74.

Дополнительные единицы

Плоский угол ***а*** —- геометрическая фигура, образованная двумя лучами (сторонами угла), выходящими из одной точки. Размерности плоский угол не имеет, единица— радиан (rad; рад).

Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

Телесный угол fi — часть пространства, заключенного внутри одной полости конической поверхности с замкнутой направляющей. Размерности телесный угол не имеет, единица — стерадиан (sr; ср).

Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

*' Новое определение единицы силы света — канделы принято на XVI ГКМВ в октябре 1979 г. Оно позволяет воспроизводить канделу без создания черного тела, что соответственно дает возможность повысить точность ее воспроизведения.

Производные единицы СИ по разделам физики

ПРОСТРАНСТВО и ВРЕМЯ

Площадь S — величина, характеризующая геометрические фигуры на плоскости и на искривленной поверхности и определяемая в простейших случаях числом заполняющих плоскую фигуру единичных квадратов, т. е. квадратов со стороной, равной единице длины: dim .S=L2 единица — квадратный метр (т^; м^).

Квадратный метр равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м.

Объем, вместимость ***V*** — величина, характеризующая геометрические тела и определяемая в простейших случаях числом умещающихся в теле единичных кубов, т. е. кубов с ребром , равным в единице длины; dim единица — кубический метр (т\ м^).

Кубический метр равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м.

Скорость *V* — величина, равная первой производной от перемещения по времени:

$$0*1 = dr/dt;$$

dim i;=LT->, единица — метр в секунду (m/s; м/с).

Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м.

Ускорение ***а*** — величина, равная первой производной от скорости по времени:

$$a = dvldf,$$

dim a=LT-2, единица — метр на секунду в квадрате (m/s2; м/с2).

Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с.

Угловая скорость ш — величина, равная первой произоводной от угла поворота по времени:.

$$® == d<f/dt;$$

dim ш=T-', единица — радиан в секунду (rad/s; рад/с).

Радиан в секунду равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за время 1 с поворачиваются относительно оси на угол 1 рая.

Угловое ускорение е — величина, определяемая первой производной от угловой скорости **по** времени:

$$e = rfo/cf^;$$

dim e=T-2, единица-радиан на секунду в квадрате (rad/s2; рад/с2).

Радиан на секунду в квадрате равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором оно за время 1 с изменяет угловую скорость на 1 рад/с.

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ЯВЛЕНИЯ

Фаза колебаний ф — аргумент функции, описывающей величину, изменяющуюся по закону гармонических колебаний. Фаза колебаний не имеет размерности, единица— радиан (rad; рад).

*' Здесь и далее обозначения векторных величин даются по их модулю, так как принадлежность величины к разряду векторных не имеет значения при определении ее размерности и единицы.

Период T — интервал времени, в течение которого совершается один цикл периодического процесса; dim 7'=T, единица — секунда (s, с).

Частота периодического процесса *f,* v — величина обратная периоду; dim v=T-", единица — герц (Hz; Гц).

Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с совершается один цикл периодического процесса.

Частота **вращения *n*** — величина, равная числу оборотов, совершаемых за время 1 с; dim n=T-', единица—секунда в минус первой степени (s-'; c~').

Секунда в минус первой степени равна частоте равномерного вращения, при которой за время 1 с тело совершает один полный оборот.

Волновое число v — величина, обратная длине волны ***X;***

$$v = 1A;$$

dim v=L-', единица — метр в минус первой степени (т-'; -k-i).

Метр в минус первой степени равен волновому числу колебаний с длиной волны 1 м.

Коэффициент затухания б — величина, обратная интервалу т, в течение которого амплитуда ***A*** уменьшается в'е раз; dim б=T-', единица — секунда в минус первой степени (s"'; c^^).

Секунда в минус первой степени равна коэффициенту затухания, при котором за время 1 с амплитуда уменьшается в е раз, где е — основание натурального логарифма.

Коэффициент ослабления ц — величина, характеризующая свойства вещества и равная отношению относительного уменьшения интенсивности ***dIjl*** излучений к длине пути ***dx,*** пройденного излучением в данном веществе:

$$din \quad .$$

dim H=L-', единица — метр в минус первой степени (т-'; м-1).

Метр в минус первой степени равен коэффициенту ослабления, при котором на расстоянии в 1 м амплитуда уменьшается в е раз, где е — основание натурального логарифма.

МЕХАНИКА

Плотность р — величина, равная отношению массы ***dm*** элемента тела к объему ***dV*** этого элемента:

$$P = dmldV;$$

dim p=ML-®, единица — килограмм на кубический метр (kg/m®; кг/м^).

Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого'при объеме 1 м^ равна] кг.

Удельный объем *v* — величина, равная отношению объема ***dV*** элемента тела к массе ***dm*** этого элемента:

$$v=dVldm \quad :$$

dim t)=L®M-', единица — кубический метр на килограмм (mVkg; м®/кг)

Кубический метр на килограмм равен удельному объему однородного вещества, объем которого при массе 1 кг равен 1 м®

Импульс (количество движения) *p* материальной точки — величина, равная произведению массы ***m*** материальной точки на ее скорость ***v:***

$$p = mv;$$

dim p=LMT-i, единица — килограмм-метр в секунду (kg-m/s; кг-м/с).

Килограмм-метр в секунду равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с.

Момент импульса (момент количества движения) ***L*** точки, вращающейся вокруг неподвижной оси, — величина, равная произведению импульса точки на расстояние ее до оси вращения:

$$L = mvr;$$

dim 1= единица — килограмм-метр в квадрате на секунду (kg-m^/s; кг-м^/с).

Килограмм-метр в квадрате на секунду равен моменту импульса материальной точки, движущейся по окружности радиусом 1 м и имеющей импульс 1 кг-м/с.

Момент инерции (динамический момент инерции) ***I*** материальной точки относительно некоторой оси - величина, равная произведению массы ***m*** материальной точки на квадрат расстояния г ее до оси вращения:

dim]= единица — килограмм-метр в квадрате (kg-m2; кг м2).

Килограмм-метр в квадрате равен моменту инерции материальной точки массой 1 кг, находящейся на расстоянии 1 м от оси вращения.

Сила ***F*** — векторная величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел. Определяется по второму закону Ньютона:

dim f=LMr-^, единица — ньютон (N; Н).

Ньютон равен силе, придающей телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^ в направлении действия силы.

Момент **силы *M*** относительно некоторой точки — величина, равная произведению силы ***F*** на плечо ***h,*** т. е. на расстояние между направлением силы и этой точкой:

$$M = Fh-,$$

dim единица — ньютон-метр (N-m; Н-м).

Ньютон-метр равен моменту силы, равной 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы.

Импульс **силы** / — величина, равная произведению силы ***F*** на интервал времени, в течение которого сила действовала:

$$dl = FdV,$$

dim /=LMT-', единица — ньютон-секунда (N-s; Н-с).

Ньютон-секунда равна импульсу силы, равной 1 Н и действующей в течение 1 с.

Давление ***p*** — величина, равная отношению силы ***dF,*** действующей на элемент поверхности нормально к ней, к площади ***dS*** этого элемента:

$$p = dFldS;$$

dim p= единица — паскаль (Ра; Па).

Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 И, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м^.

Примечание. В Паскалях выражаются также нормальное и касательное напряжения, а также модули продольной упругости, сдвига и объемного сжатия.

Динамическая вязкость т) является коэффициентом пропорциональности в формуле силы внутреннего трения:

где ***dvldl*** — градиент скорости; ***AS*** **—** площадь поверхности слоя, на которую рассчитывается сила внутреннего трения; dim ti=L-'MT-', единица — паскаль-секунда (Па s; Па-с).

Паскаль-секунда равна динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и при разности скоростей слоев, находящихся на расстоянии 1 м по нормали к направлению скорости 1 м/с, равно 1 Па.

Кинематическая вязкость v — величина, равная отношению динамической вязкости среды **к** ее плотности:

тl/ρ;

dim единица—• квадратный метр на секунду (mVs; м7с).

Квадратный метр на секунду равен кинематической вязкости среды с динамической вязкостью 1 Па-с и плотностью 1 кг/м'.

Поверхностное натяжение а жидкости — величина, равная отношению силы ***dF,*** действующей на участок контура свободной поверхности нормально к контуру **и** по касательной к поверхности, к длине ***dl*** этого участка:

$$a = dFldl;$$

dim a=MT-^ единица — ньютон на метр (N/m; Н/м).

Ньютон на метр равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой 1 Н, действующей на участок контура свободной поверхности длиной 1 м нормально к контуру и по касательной к поверхности.

Работа. Элементарной работой ***dA*** называют величину, равную скалярному произведению силы F на элементарное перемещение ***ds:***

$$dA = \mathbf{F}\mathbf{ds} = Fds \cos a;$$

dim ***A=UbM-***\ единица — джоуль (J; Дж).

Джоуль равен работе силы 1 Н, перемещающей тело на расстояние 1 м в направлении действия силы.

Примечание. В джоулях выражаются также все виды энергии.

)Ющность ***N, P*** — величина, равная отношению работы ***dA*** к бесконечно малому интервалу времени ***dt,*** в течение которого эта работа совершается:

$$N=dAldf,$$

dim единица —ватт (W; Вт).

Ватт равен мощности, при которой работа в 1 Дж производится за время 1 с.

Температурный коэффициент а — величина, равная отношению относительного изменения dX/Xo физической величины к изменению ***dT*** температуры от принятой **за** начальную:

$$a = dX/(XcdT),$$

где Хо —значение физической величины при температуре, принятой за начальную; dim единица — кельвин в минус первой степени (К""; К"');

Кельвин в минус первой степени равен температурному коэффициенту относительного изменения физической величины, при котором изменение температуры на 1 К от принятой за начальную вызывает относительное изменение этой величины, равное единице.

Температурный градиент grad ***T*** — векторная величина, численно равная изменению температуры на единице длины **и** направленная в сторону наиболее быстрого изменения температуры температурного поля; dim grad Г=b-' 6, единица — кельвина на метр (К/т; К/м).

Кельвин на метр равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной 1 м в направлении градиента температура изменяется на 1 К.

Внутренняя энергия *U* системы — энергия хаотического теплового движения всех микрочастиц системы (молекул, атомов, ионов и **т.** п.) и энергия взаимодействия этих частиц.

Внутренняя энергия, как и любая другая энергии, имеет размерность работы: dim и выражается в джоулях (J; Дж).

Теплота, количество теплоты *Q* — часть внутренней энергии, которая самопроизвольно, без внешнего воздействия переходит **от** тел более нагретых к телам менее нагретым посредством теплопроводности или лучеиспускания; dim Q=L2MT-2, единица—джоуль (J; Дж).

Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж.

Примечание. В джоулях также выражаются термодинамический потенциал (энтальпия, изохорно-изотермический потенциал, изобарио-изотермический потенциал), теплота фазового превращения, теплота химической реакции.

Тепловой поток Ф через некоторую поверхность — величина, равная отношению количества теплоты ***dQ,*** прошедшей через эту поверхность, ко времени ***dt,*** за которое прошло это количество теплоты:

Размерность теплового потока равна размерности мощности: dim Ф= единица — ватт (W, Вт).

Ватт равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

Поверхностная плотность теплового потока *q* — величина, равная отношению теплового потока йФ к площади ***dS*** поверхности, через которую проходит этот поток:

$$q = d^ldS;$$

dim единица —ватт на квадратный метр (W/m2; Вт/м^).

Ватт на квадратный метр равен поверхностной плотности теплового потока, при которой тепловой поток 1 Вт равномерно распределен по поверхности площадью 1 м^.

Коэффициент теплопроводности Я **— величина,** равная плотности теплового потока, обусловленного теплопроводностью при градиенте температуры, равном единице. Входит в качестве коэффициента в формулу, определяющую количество теплоты, перенесенное за время ***t*** через поверхность площадью S в направлении нормали к этой поверхности:'

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dx} s,$$

где dl/dx — градиент температуры; dim X=LMT-® G-', единица — ватт на метр-кельвин (W/(m-K): Вт/(м-К)).

Ватт на метр-кельвин равен коэффициенту теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью теплового потока 1 Вт/м« устанавливается температурный градиент 1 К/м.

Теплоемкость ***C*** тела (системы) — величина, равная отношению количества теплоты ***dQ,*** необходимой для нагревания тела (системы тел), к разности температур ***dT*** тела:

$$C = dQ/dT;$$

dim C=L2MT-2e-', единица —джоуль на кельвин (J/K; Дж/К).

Джоуль на Кельвин равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 **К** при подведении к системе качиества теплоты 1 Дж

Удельная теплоемкость *с* вещества — величина, равная отношению теплоемкости ***С*** однородного тела (системы) к его массе:

$$c=C1m;$$

dim единица — джоуль на килограмм-кельвин (J/(kg K); Дж/(кг-К)).

Джоуль на килограмм'кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К.

Температуропроводность *а* — величина, характеризующая скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности и равная отношению коэффициента теплопроводности X к объемной теплоемкости Ср вещества:

где Ср — удельная теплоемкость вещества при постоянном давлении; р — плотность вещества; dim a^L^T"', единица — квадратный метр на секунду (m^/s; м^/с).

Квадратный метр на секунду равен температуропроводности вещества с коэффициентом теплопроводности 1 Вт/(м-К), удельной теплоемкостью при постоянном давлении 1 Дж/(кг-К) и плотностью 1 кг/м^.

Удельная газовая постоянная *В* — величина, равная отношению работы ***dA,*** совершаемой идеальным газом при изобарном нагревании, к массе газа m и интервалу температур ***dT,*** на который газ нагревается:

$$B=dA/(mdT);$$

dim B=L2T-^e-^ единица — джоуль на килограмм-Кельвин (J/(kg-K); Дж/(кг-К)).

Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной газовой постоянной идеального газа массой 1 кг, совершающего при повышении температуры на I К при постоянном давлении работу 1 Дж.

Энтропия S системы — однозначная функция состояния системы, определяемая соотношением

$$dS = dQ/T,$$

где ***dQ*** — бесконечно малое количество теплоты, сообщенной системе при температуре ***Т;*** dim Q=L2MT"^6-', единица — джоуль на Кельвин **(J/K;** Дж/К).

Джоуль на Кельвин равен изменению энтропии системы, которой при температуре пК в изотермическом процессе сообщается количество теплоты пДж.

Удельная энтропия s — величина, равная отношению **энтропии *dS* к массе *dm* системы:**

$$S = dS/dm;$$

dim s=L2T-2e-', единица —джоуль на килограмм-кельвин (J/(kg-K): Дж/(кг-К)),

Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной энтропии вещества, в котором при массе 1 кг изменение энтропии составляет 1 Дж/К-

Удельное количество теплоты *q* — величина, равнаи отношению количества теплоты ***dQ,*** подводимого к системе или отводимого от нее в ходе процесса, к массе ***dm*** системы:

$$q=dQ\backslash dm\backslash$$

dim единица — джоуль на килограмм (J/kg; Дж/кг).

Джоуль на килограмм равен удельному количеству теплоты процесса, в ходе которого к веществу массой 1 кг подводится (или отводится от него) количество теплоты 1 Дж.

Примечание. В джоулях на килограмм выражаются также удельный термодиначеский потенциал, удельная теплота фазового превращения, удельная теплота химической реакции.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ*'

Количество электричества (электрический заряд) ***Q*** — величина, равная произведению силы тока ***I*** на время ***t,*** в течение которого шел ток:

$$Q = It;$$

dim Q=TI, единица — кулон (С; Кл).

Кулон равен количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника при токе силой 1 А за время 1 с.

Пространственная плотность электрического заряда р — величина, равная отношению заряда ***dQ,*** находящегося в элементе пространства, к объему ***dV*** этого элемента:

$$p = dQ/dV;$$

dim p=L-^TI, единица — кулон на кубический метр (С/тЗ; Кл/мЗ).

Кулон на кубический метр равен пространственной плотности электрического заряда, при которой в объеме 1 м^ равномерно распределен заряд **1** Кл.

Поверхностная плотность электрического заряда а — величина, равная отношению заряда ***dQ,*** находящегося на элементе поверхности, к площади ***dS*** этого элемента:

$$:j=dQ/dS;$$

dim 0=L-2T1, единица — кулон на квадратный метр (С/т^; Кл/м=).

Кулон на квадратный метр равен поверхностной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по поверхности площадью 1 м^, равен 1 Кл.

Линейная плотность электрического заряда т—величина, равная отношению заряда ***dQ,*** находящегося на элементе линии, к длине ***dl*** этого элемента:

$$x = dQ\backslash dl;$$

dim **t**=L-**i**TI, единица—кулон на метр (С/т; Кл/м).

Кулон на метр равен линейной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по линии длиной 1 м, равен 1 Кл.

Электрическое напряжение *U* — величина, равная отношению мощности ***P*** постоянного тока к силе тока ***I:***

$$u = P/I;$$

dim t/=L2MT-3l-', единица — вольт (V; В).

Вольт равен электрическому напряжению, вызывающему **в** электрической цепи постоянный ток силой 1 **А** при мощности 1 Вт.

Примечание. В вольтах выражаются также электрический потенциал и разность потенциалов электрического поля, электродвижущая сила.

Напряженность электрического поля *Е* — векторная величина, равная отношению силы ***dF,*** действующей на положительный заряд ***dQ,*** помещенный в некоторую точку электрического поля, к этому заряду:

$$E = dF/dQ;$$

dim £=LMT-n-', единица — вольт на метр (V/m, В/м).

*' Электрические и магнитные единицы СИ следует образовывать в соответствии с рационализованной формой уравнений электромагнитного поля.

Вольт на метр равен напряженности однородного электрического поля, создаваемой разностью потенциалов 1 В между точками, находящимися на расстоянии 1 м на линии напряженности поля.

Поток электрического смещения сквозь замкнутую поверхность — величина, равная алгебраической сумме электрических зарядов, содержащихся во внутреннем пространстве этой поверхности:

dim 4^=11, единица — кулон (С; Кл).

Кулон равен потоку электрического смещения, связанному с суммарным свободным зарядом 1 Кл.

Электрическое смещение *D* — величина, равная отношению потока электрического смещения **dV** к **площади *dS*** элемента поверхности, через которую этот поток проходит:

$$D = rf'T/rfS;$$

dim D=L-2TI, единица — кулон на квадратный метр (С/гп2; Кл/м2).

Кулон на квадратный метр равен электрическому смещению, при котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью 1 м' равен 1 Кл.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость Ео. е*' среды является коэффициентом пропорциональности в формуле, связывающей между собой смещение и напряженность электрического поля:

D =

dim единица — фарад на метр (F/m; Ф/м).

Фарад на метр равен абсолютной диэлектрической проницаемости среды, в которой напряженность электрического поля 1 В/м создает электрическое смещение 1 Кл/м2.

Примечание. В фарадах на метр выражается также электрическая постоянная во.

Электрический момент диполя ***p*** — векторная величина, равная произведению заряда Q диполя на его плечо /:

$$P = Ql-,$$

dim p=LTI, единица — кулон-метр (С-m; Кл-м).

Кулон-метр равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый 1 Кл, расположены на расстоянии 1 м один от другого.

Плотность **электрического** тока / — величина, равная отношению силы тока ***dl*** к площади ***dS*** поперечного сечения:

$$i = dUdS-,$$

dim /=L-21, единица — ампер на квадратный метр (А/т2; А/м2).

Ампер на квадратный метр равен плотности равномерно распределенного по поперечному сечению площадью 1 м^ электрического тока силой 1 А.

Линейная плотность электрического тока ***А*** — величина, равная отношению силы тока ***dl*** в тонком листовом проводнике к ширине ***da*** этого проводника:

$$A == dUda-,$$

dim A=L-4, единица — ампер на метр (А/т; А/м).

Запасное обозначение (е) обязательно в технической документации и литературе, специально предназначенной для отправки за границу.

Ампер на метр равен линейной плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по сечению тонкого листового проводника шириной 1 м, равна 1 А.

Электрическое сопротивление *R* — величина, характеризующая проводник и являющаяся коэффициентом пропорциональности в формуле, связывающей между собой напряжение U и силу тока /:

$$V = Rl\backslash$$

dim R = U m - 4 - ^ единица — Ом (й; Ом).

Ом равен сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение 1 В при силе тока 1 А.

Электрическая проводимость G — величина, обратная сопротивлению:

$$0 = 1 / ; ? ;$$

dim G=L-2M-'T®P, единица — сименс (S; См).

Сименс равен электрической проводимости проводника сопротивлением 1 Ом.

Удельное электрическое сопротивление р вещества — величина, численно равная сопротивлению проводника **длиной,** равной единице **длины, и** площадью поперечного сечения, равной единице площади; dim р= единица — ом-метр (й-т; Ом-м).

Ом-метр равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения 1 м^ и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом.

Удельная электрическая проводимость *g* вещества — величина, обратная удельному электрическому сопротивлению:

dim единица — сименс на метр (S/m; См/м).

Сименс на метр равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения 1 м^ и длине 1 м имеет электрическую проводимость, равную 1 См.

Напряженность магнитного поля Я— величина, характеризующая магнитное поле. Размерность и единица ее могут быть определены по формуле напряженности поля в центре длинного соленоида:

$$H = n1-,$$

dim //=L-4, единица — ампер на метр (**А**/т; А/м).

Ампер на метр равен напряженности магнитного поля в центре длинного соленоида с равномерно распределенной обмоткой, по которой проходит ток силой I//г А, где ***п*** — число витков на участке соленоида длиной 1 м.

Магнитодвижущая сила Fm — величина, характеризующая намагничивающее действие электрического тока и равная циркуляции напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура:

$$^{} Hidl;$$

dim ***Fm=I,*** единица — ампер (А; А).

Ампер равен магнитодвижущей силе вдоль замкнутого контура, сцепленного с контуром постоянного тока силой 1 А.

Примечание. В амперах выражается также разность магнитных потенциалов.

Магнитный поток. Единица и размерность магнитного потока Ф определяются по формуле

где ***Q*** — количество электричества, проходящего в замк-

нутом контуре при изменении до нуля магнитного потока ф, сцепленного с этим контуром. Из этой формулы следует: dim Ф=Ь2МТ-21-', единица — вебер (Wb; Вб).

Вебер равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сеченне проходит кадичество электричества 1 Кл.

Магиитиая индукция ***B*** — величина, равная отношению магнитного потока ЙФ к площади ***dS*** сечения, через которое проходит этот поток:

dim B=MT-21-i, единица — тесла (T; Тл).

Тесла равна магнитной индукции, при которой через поперечное сечение площадью 1 м^ проходит магнитный поток 1 Вб.

Индуктивность *L* — величина, характеризующая замкнутый контур и являющаяся коэффициентом пропорциональности между магнитным потоком, сцепленным **с** этим контуром, и силой тока в нем:

Ф = L/;

dim Z.=L2MT-2l-2, единица — генри (Н; Ги).

Генри равен индуктивности электрической цепи, **с** которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб.

Примечание. В генрп выражается также взаимная индуктивность.

Абсолютная магнитная проницаемость [Хо, ц*' является коэффициентом пропорциональности между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля:

dim единица — генри на метр (Н/т; Ги/м).

Генри на метр равен абсолютной магнитной проницаемости среды, в которой напряженность магнитного поля 1 А/м создает магнитную индукцию 1 Тл.

Примечание. В генри на метр выражается также магнитная постоянная [хо.

Магнитный **момент** (амперовский) Рш контура с током — величина равная произведению силы тока ***I*** в контуре на площадь S, ограниченную им:

Pm = 1S-,

dim pm=L4, единица — ампер-квадратный метр (А-т^; А•м^).

Ампер-квадратный метр равен магнитному моменту электрического тока силой 1 А, проходящего по контуру площадью 1 м^.

Примечание. Размерность магнитного момента (кулоновского) dim pm=L3MT-2l-», единица — вебер-метр (Wb-m; Вб-м).

Намагниченность (интенсивность намагничения) М — величина, равная отношению суммы магнитных моментов всех магнитных диполей, входящих в элемент магнетика, к объему ***dV*** этого элемента:

где Pm.i—магнитный момент i-го диполя; iV —число диполей, входящих в элемент магнетика; dim = единица - ампер на метр (А/т; А/м).

Ампер на метр равен намагниченности, при которой вещество объемом 1 м^ имеет магнитный момент 1 А-м".

Магнитное сопротивление *Rm* — величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности **в** формуле, выражающей зависимость магнитного потока Ф от магнитодвижущей силы Fm:

Fm =

dim Rm=L-Ш-^^Ч^, единица — генри в минус первой степени (Н"'; Ги"').

Генри в минус первой степени равен магнитному сопротивлению магнитной цепи, в которой магнитодвижущая сила 1 А создает магнитный поток 1 Вб.

Магнитная проводимость А —величина, обратная магнитному сопротивлению:

dim Jm=L2MT-Ч-^ единица — генри (Н; Ги).

Генри равен магнитной проводимости магнитной цепи **с** магнитным сопротивлением 1 Гы-i.

Энергетическая экспозиция //<т—величина, равная отношению энергии dW излучения, падающего на поверхность к площади ***d&*** этой поверхности:

He=dW/dS-.

dim We=MT-2, единица — джоуль на квадратный метр (J/m=; Дж/м2).

Джоуль на квадратный метр равен энергетической экспозиции, при которой на поверхность площадью 1 м^ падает излучение с энергией 1 Дж.

Поток излучения Фо —величина, равная отношению энергии излучения AW, переносимой излучением, к времени М переноса, значительно превышающему период колебаний, т. е.

dim Фе=Ь2МТ-®, т. е. совпадает с размерностью мощности, единица — ватт (W; Вт).

Ватт равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

Энергетическая светимость (излучательность) — величина, равная отношению потока излучения ЙФ. к площади ***dS,*** **с** которой это излучепир испускается:

M^ = di^eldS;

dim = единица — ватт на квадратный метр (W/m2; Вт/м2).

Ватт на квадратный метр равен энергетической светимости, при которой поверхность площадью 1 м^ излучает поток излучения 1 Вт.

Облученность Ее — величина, равная отношению потока излучения ***dФе*** к площади ***dS,*** которой это излучение поглощается:

Ee = d%ldS-,

dim = единица — ватт на квадратный метр (W/m2; Вт/м2).

Ватт на квадратный метр равен облученности, при которой поверхность площадью 1 м^ поглощает поток излучения 1 Вт.

Сила **излучения *h*** — величина, равная отношению потока излучения dOe источника к телесному углу ***dQ,*** в пределах которого распространяется это излучение:

dim = единица — ватт на стерадиан (W/sr; Вт/ср).

*' Запасное обозначение ([л) обязательно в технической документации и литературе, специально предназначенной для отправки за границу.

Ватт на стерадиан равен силе излучения света точечного источника, излучающего в телесном угле 1 ср поток излучения 1 Вт.

Энергетическая яркость *Be* — величина, равная отношению энергетической силы света d/c элемента излучающей поверхности к площади ***dS*** проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения:

$$Be = dIeldS-,$$

dim единица — ватт на стерадиан-квадратный метр (W/(sr-m2): (Вт/(ср-м2)).

Ватт на стерадиан-квадратный метр равен энергетической яркости равномерно излучающей плоской поверхности площадью 1 м^ в перпендикулярном к ней направлении при энергетической силе света 1 Вт/ср.

Световой поток Фт„ испускаемый источником света в некоторый телесный угол, — величина, равная произведению силы света ***I*** источника на этот телесный угол fi;

$$\Phi^ = IQ;$$

dim Фо=/, единица — люмен (Im, лм).

Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.

Световая энергия *Q* — величина, равная произведению светового потока Фи **на** время ***t,*** **в** течение которого излучается **(или** воспринимается) **этот** световой поток:

dim Q=TJ, единица — люмен-секунда (Im-s; лм-с).

Люмен-секунда равна световой энергии светового потока в 1 лм, действующего в течение 1 с.

Яркость *B*^ светящейся поверхности в некотором направлении ф — величина, равная отношению силы света ***I*** в этом направлении к площади S проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению:

$$= \cos<f);$$

dim B=L-2J, единица — кандела на квадратный метр (kd/m^; кд/м2).

Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м^ при силе света 1 кд.

Светимость *R* — величина, равная отношению светового потока dOi,, испускаемого светящейся поверхностью, к ее площади ***dS:***

$$,/dS-,$$

dim /?=L-y, единица — люмен на квадратный метр (ImArf; лм/м=).

Люмен на квадратный метр равен светимости поверхности площадью 1 м^, испускающей световой поток 1 лм.

Освещенность *E* — величина, равная отношению светового потока йФи, падающего на элемент поверхности, к площади ***dS*** этого элемента:

$$E = d\% I dS;$$

dim £'=L-2J, единица —люкс (Ix; лк).

Люкс равен освещенности поверхности площадью 1 м^ при падающем на нее световом потоке 1 лм.

Световая экспозиция *H* — величина, равная произведению освещенности ***E*** на время ***t,*** в течение которого происходит облучение:

$$H = Ef.$$

dim Я=L-2TJ, единица — люкс-секунда (Ix-s; лк-с).

Люкс-секунда равна световой экспозиции, создаваемой за время 1 с при освещенности 1 лк.

АКУСТИКА

Звуковое давление р—давление, дополнительно возникающее в газообразной **или жидкой** среде при прохождении через **нее** звуковых волн. Звуковое давление, как и любое другое давление, имеет размерность dim p= =L-iMT-2 и выражается в Паскалях (Ра; Па).

Колебательная скорость £) — величина, равная произведению амплитуды ***A*** колебаний частиц среды, через которую проходит звук, на угловую частоту w:

$$Л®;$$

dim £)=LT-', единица — метр в секунду (m/s; м/с).

Объемная скорость звука ***q*** — величина, равная произведению колебательной скорости ***v*** на площадь S поперечного сечения канала, в котором распространяется звук:

$$q = vS-,$$

dim единица — кубический метр в секунду (**mVs**; mVC).

Кубический метр в секунду равен объемной скорости звука при колебательной скорости 1 м/с и площади поперечного сечения канала 1 м^.

Звуковая энергия W — энергия частиц среды, в которой распространяется звук. Звуковая энергия, как и любая другая энергия, имеет размерность dim W=hmr-^ и выпажается в джоулях (J; Дж),

Плотность звуковой **энергии** — величина, равная отношению звуковой энергии ***dW,*** содержащейся в элементе канала, **к** объему ***dV*** этого элемента:

$$w = dW/dV;$$

dim единица — джоуль на кубический метр (J/m'; Дж/м^).

Джоуль на кубический метр равен плотности звуковой энергии о канале объемом 1 м^ при звуковой энергии 1 Дж.

Поток звуковой энергии (звуковая мощность) Р— величина, равная отношению звуковой энергии ***dW,*** проходящей через поверхность, к интервалу времени ***dt,*** за который эта энергия проходит:

$$P=dWldt;$$

dim P=L2MT-^ единица —ватт (W; Вт).

Интенсивность звука / — величина, равная отношению потока ***dP*** звуковой энергии через поверхность, перпендикулярную направлению распространения звука, к площади ***dS*** этой поверхности:

$$I=dPldS;$$

dim /=MT-^, единица — ватт на квадратный метр (W/m^, Вт/м^).

Ватт на квадратный метр равен интенсивности звука в канале при потоке звуковой энергии 1 Вт и площади поперечного сечения 1 м^.

Акустическое сопротивление канала является коэффициентом пропорциональности в равенстве, связывающем между собой амплитуду ро звукового давления **и** объемную скорость ***q*** звука:

$$Po = Zaq\backslash$$

dim единица — паскаль секунда на кубический метр (Pa-s/m^; Па-с/м®).

Паскаль-секунда на кубический метр равна акустическому сопротивлению канала, в котором создается объемная скорость 1 м'/с при звуковом давлении 1 Па.

Удельное акустическое сопротивление *Zs* — величина, равная произведению акустического сопротивления на площадь S поперечного сечения канала:

Zs =

dim Zs=L-^MT-i, единица — паскаль-секунда иа метр (Pa-s/m; Па-с/м).

Паскаль-секунда на метр равна удельному акустическому сопротивлению канала площадью поперечного сечения I м^, имеющего акустическое сопротивление 1 Па-с/м2.

Механическое сопротивление Zm — величина, равная отношению силы ***F,*** действующей на поперечное сечение канала, **в** котором распространяется звук, к средней колебательной скорости <f>B этом сечении:

Z^^^FKvy,

dim единица — ньютон-секунда на метр (N-s/m; Н-с/м)."

Ньютон-секунда на метр равна механическому сопротивлению канала, в котором при силе 1 Н возникает колебательная скорость 1 м/с.

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Молярная масса M —величина, равная отношению массы ***m*** системы (тела) к количеству вещества ***n*** системы:

M = m/n;

dim M=MN-', единица — килограмм на моль (kq/mol; кг/мадь).

Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг.

Молярный объем *Vm* — величина, равная отношению объема ***V*** системы (тела) к ее количеству вещества л:

dim единица — кубический метр на моль (m^/mol; м^/моль).

Кубический метр на моль равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества 1 моль объем 1 м'.

Молярная внутренняя энергия U^{m} — величина, равная отношению внутренней энергии ***dU*** системы (тела) к ее количеству вещества ***dn:***

U^ = dUldn;

dim единица — джоуль на моль (J/mol; Дж/моль).

Джоуль на моль равен молярной внутренней энергии вещества в количестве 1 моль, внутренняя энергия которого равна 1 Дж.

Примечание. В джоулях на моль выражаются также молярная энтальпия, химический потенциал, химическое сродство, энергия активации.

Молярная теплоемкость *C* — величина, равная отношению теплоемкости системы (тела) к ее количеству вещества:

= C/n;

dim Cm=L2MT-2e-'N-', единица — джоуль на моль-кельвин (J/(mol-K); Дж/(моль-К)).

Джоуль на моль-кельвин равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкость 1 **Дж/К.**

Примечание. В джоулях на моль-кельвин выражается также молярная энтропия.

Концентрация молекул *n* однородной системы — величина, равная отношению числа ***dN*** молекул системы к ее объему ***dV:***

n = dN/dV;

dim n=L-^ единица — метр в минус третьей степени (т-', м-').

Метр в минус третьей степени равен концентрации молекул, при которой в элементе системы объемом 1 м' содержится одна молекула.

Молярная концентрация вещества *B* в смеси (растворе, сплаве)— отношение количества веществами к объему ***dV*** смеси (раствора, сплава):

Cj^^drij^ldV,

dim **Cs=L^'N,** единица — моль на кубический метр (mol/m^ моль/м^).

Моль на кубический метр равен молярной концентрации вещества в растворе, при которой в объеме раствора 1 м' содержится количество растворенного вещества, равное 1 моль.

Примечание. Ранее дли этой величины применяли термин «молярность», который теперь исключен из международных рекомендаций по терминологии физической химии.

Моляльность *Ьв* раствора компонента — отношение количества вещества ***dn*** растворенного компонента к массе ***dm*** растворителя:

Ъ^ = dn/dm;

dim fcB=M-'N, единица — моль на килограмм (mol/kg; моль/кг).

Моль на килограмм равен моляльности раствора, при которой на массу растворителя I кг приходится количество вещества, равное 1 моль.

Примечание. В молях на килограмм выражается также удельная адсорбция.

Массовая концентрация компонента *B* в смеси (растворе, сплаве) — величина, равная отношению массы ***dm*** компонента ***B*** к объему ***dV*** смеси (раствора, сплава):

= dmj^ldV,

dim PB=**L**-^**M**, единица — килограмм на кубический метр (kg/m^; кг/м®).

Килограмм на кубический метр равен массовой концентрации компонента, при которой в объеме смеси (раствора, сплава) 1 м^ содержится компонент массой 1 кг.

Скорость химической реакции *v* — величина, равная отношению изменения ДСв молярной концентрации исходного вещества в растворе к времени реакции:

v^ACjj/Af,

dim f=L-®T-'N. единица — моль в секунду на кубический метр (mol/(s-m®); моль/(с-м^)).

Моль в секунду на кубический метр равен средней скорости одномолекулярной химической реакции, при которой за время 1 с молярная концентрация исходного вещества в растворе изменяется на 1 моль/м^.

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Масса **покоя** частицы, атома, ядра ***m;*** dim ***m=M,*** единица — килограмм ***(kg;*** кг).

Дефект массы *Am; dim Am=M,* единица — килограмм (kg; кг).

Элементарный заряд *e;* dim e=T1, единица — кулоп (С; Кл).

Магнитный момент атома, ядра ц; dim ц=ЬЧ, единица — ампер-квадратный метр (А-т^; А-м^).

Магнетон ядерный ЛХ; dim (LLV=**L2I**, единица — ампер-квадратный метр (А-т^; А-м^).

Гиромагнитное отношение *y;* dim y=**M-4I**, единица— ампер-квадратный метр на джоуль-секунду (А-т^/ /**(J-S);** А-м2/(Дж-с)).

Ядерный квадрупольный момент Q; dim Q=L2, единица -квадратный метр (т®; м^).

Силовая постоянная колебательного спектра молекулы — размерность МТ-^, единица — ньютон на метр (N/m; Н/м).

Энергия связи *Ecs;* dim fca^L^MT-^, единица — джоуль (J; Дж).

Ширина уровня Г; dim Г=Ь2МТ-2, единица —джоуль (J, Дж).

Перенос (флюенс) частиц — размерность единица—метр в минус второй степени (т-^, м-^).

Плотность потока частиц ф; dim (p=L-2T-i, едини.^ца — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени (s-i-m-^; с-'-м^^).

Перенос (флюенс) энергии — размерность МТ-^, единица -джоуль на квадратный метр (J-m-^, Дж • м-^).

Эффективное сечение о; dim единица — квадратный метр (т^; м2)

Дифференциальное эффективное сечение da/dQ; dim (£Jo/dQ)=L2, единица — квадратный метр на стерадиан (mVsr;M2/cp).

Спектральное эффективное сечение — размерность М-'Т2, единица — квадратный метр на джоуль (m^/J; м7Дж).

Линейный коэффициент ослабления jii; dim единица —метр в минус первой степени (m-i; м-i).

Атомный коэффициент ослабления dim = единица — квадратный метр (т^; м^).

Массовый коэффициент ослабления Цч; dim |.Лт= = единица — квадратный метр на килограмм (mVkg; м'/кг).

Массовый коэффициент преобразования энергии — размерность L^M"', единица — квадратный метр на килограмм (mVkg; м7кг).

Массовый коэффициент поглощения — размерность **L^M-',** единица — квадратный метр на килограмм **(m^/kg;** *шЬ'/кг).*

Длина среднего пробега • </> dim </> =L, единица— метр (т; м).

Средний массовый пробег — размерность **L-^M,** единица—килограмм на квадратный метр (kg/m^; кг/м^).

Линейная плотность ионизации — размерность **L"',** единица —метр в минус первой степени (т"'; м"').

Толщина слоя половинного ослабления di^; dim di'/2>=L, единица — метр (m; м).

Тормозной эквивалент — размерность L, длина — метр (т; м).

Тормозная способность (линейная)— размерность **LMT-2,** единица —джоуль на метр **(J/m;** Дж/м).

Линейное преобразование энергии — размерность LMT-2, единица — джоуль на метр **(J/m;** Дж/м).

Средняя энергия ионообразования — размерность L2MT-2, единица - джоуль (J; Дж).

Атомная тормозная способность — размерность L m r - \ единица — джоуль-квадратный метр **(J-m^;** Дж-м2).

Массовая тормозная способность — размерность L^T-2, единица — джоуль-квадратный метр на килограмм (J-m2/**kg;** Дж-м^/кг).

Подвижность *Ь;* **dim** b=M-iT2I, единица — квадратный метр на вольт-секунду (m2/(V-s); м^/(В-с))

Потока нейтронов Ф; dim Ф=Т-', единица — секунда в минус первой степени (s-

Концентрация ионов, нейтронов *n;* dim единица— метр в минус третьей степени (т-®; м"^).

Объемная скорость нейтронов — размерность L-^T-', единица — секунда в минус первой степени-метр в минус третьей степени (s-'-m-®; с-'-м-®).

Плотность замедления — размерность L-^T-i, единица — секунда в минус первой степени-метр в минус третьей степени (s-'-m-'; с-'-м"^).

Замедляющая **способность среды** — размерность **L"',** единица — метр в минус первой степени (т-'; м^')

Коэффициент диффузии для плотности потока нейтронов — размерность L, единица — метр (т; м^

Возраст нейтрона - размерность **L^,** единица — квадратный **метр (т^;** м^).

1.3. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИИ

Величины и единицы, характеризующие ионизирующее излучение и его поле

Энергия ионизирующих частиц ***E:*** dim единица — джоуль (J; Дж).

Предпочтительные единицы: эВ; кэБ; МэВ; ГэВ.

Энергия ионизирующего излучения ***w*** — суммарная энергия ионизирующих частиц (без учета энергии покоя), испущенная, переданная или поглощенная; dim ш= = L2MT-2, единица — джоуль **(J;** Дж).

Предпочтительные единицы: фДж; пДж; нДж; мкДж; мДж; Дж; кДж; МДж.

Масса **покоя** частицы, атома, атомного ядра гПа, dim та=т, единица — килограмм (kg; кг).

Предпочтительная единица: атомная единица массы (а.е.м.).

Поток ионизирующих частиц ***F*** — отношение числа ионизирующих частиц ***dN,*** проходящих через данную поверхность за интервал времени ***dt,*** к этому интервалу:

$$F = dN/dt;$$

dim F=T-', единица — секунда в минус первой степени (S-'; с-').

Секунда в минус первой степени равна потоку ионизирующих частиц, при котором через данную поверхность за 1 с проходит одна частица.

Предпочтительные единицы: с"'; мин-'.

Перенос (флюенс) ионизирующих частиц Ф — отношение числа ионйзирующих частиц ***dN,*** проникающих в элементарную сферу, к площади ***dS*** центрального сечения этой сферы:

$$\Phi = d/V'/dS;$$

dim Ф=Ь-единица —метр в минус второй степени (т-2; м-2).

Метр в минус второй степени равен переносу (флюенсу) ионизирующих частиц, при котором в сферу с площадью центрального сечения 1 м^ проникает одна частица.

Предпочтительная единица: см-^.

Плотность потока ионизирующих частиц ф — отношение потока ионизирующих частиц ***dF,*** проникающих в элементарную сферу, к площади ***dS*** центрального сечонния этой сферы:

$$<(= dFldS = di^dt = (PN/(dS \cdot dt);$$

dim единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени (s-'-m-^; с-'-м-^).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени равен плотности потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения 1 м^ за 1 с проникает одна частица.

Предпочтительные единицы: -см-

Энергетическая плотность потока ионизирующих час^ тиц (p(£')—отношение плотности потока ионизирующих частиц <p с энергией ***от E ao E+dE*** к энергетическому интервалу ***dE:***

$$il(E) = d<\text{ƒ}/d\text{£} = d\text{^}F/(dS \cdot dE) = \quad \cdot dE)=\text{^}$$

$$= O'NKdS \cdot dt \cdot dE)\text{-},$$

dim ф(£')=Ь-"М-'Т, единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени (s-'-m-^-J-'; с-'-м-^-Дж-').

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени равен энергетической плотности потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения 1 м^ за 1 с проникает одна частица с энергией, заключенной в энергетическом интервале 1 Дж.

Предпочтительные единицы: с-'-см-^х ХэВ-'; С-1-СМ-2.КЭВ-1; с"!-СМ-^-MSB-I.

Угловая плотность потока ионизирующих частиц <p(£) — отношение плотности потока ионизирующих частиц ***dw,*** распространяющихся в пределах элементарного телесного угла ***dQ,*** ориентированного в направлении Й, к этому телесному углу:

$$\text{^}(Q) = d(p/dQ = d\text{^}\Phi/\{dt \cdot \mathrm{d}Q)=$$

$$d\text{^}F/(dS \cdot dQ) = dm/(dS \cdot dt - dQ);$$

dim (p(R)=L2T-i, единица — секунда в минус первой степеии-метр в минус второй степени-стерадиан в минус первой степени (s-'-m-^-sr-'; с-'-м^^-ср-').

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-стерадиан в минус первой степени равен угловой плотности потока ионизирующих частиц, при которой поверхность площадью 1 м^ перпендикулярную направлению движения частицы, за 1 с пересекает одна ионизирующая частица, движущаяся в телесном угле

Предпочтительная единица: с-'-см-'х Хср-1.

Энергетическо-угловая плотность потока ионизирующих частиц (р (£, Q)—отношение плотности потока (р ионизирующих частиц с энергией от ***E*** до ***E-^dE,*** распростоаняющихся в пределах элементарного телесного угла ***dQ,*** ориентированного в направлении Q к энергетическому интервалу ***dE*** и этому телесному углу:

$$\text{Ч}(E, \ 0) = \frac{d\text{E} \cdot dQ \qquad dS\text{-}dE \cdot dQ \qquad dt - dE \cdot dQ}{\underline{d\,W}}.$$

$$\sim \quad dS \cdot dt \cdot dE \cdot dQ$$

dim ***(E,*** fi) = L—'М-'Т, единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени-стерадиан в минус первой степени **(s-'x** Xrn-2• J-' -sr-'; с - ' - • Дж-'• ср-1).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-доюуль в минус первой степени-стерадиан в минус первой степени равен энергетическо-угловой плотности потока ионизирующих частиц, при которой поверхность площадью 1 м^ перпендикулярную направлению движения частицы, за 1 с пересекает одна иони^ зирующая частица с энергией, заключенной в энергетиче^ ском интервале 1 Дж, движущаяся в телесном угле 1 ср.

Предпочтительные единицы: с-'-см-^х! эВ-'-ср-'; с-'-см-2.кэВ-'-ср-'; с-'-см-'-МэВ-i-ср-',

Поток **энергии ионизирующего излучения *Fw*** — отношение энергии ионизирующего излучения ***dw,*** проходя-Sщего через данную поверхность **за** интервал времени ***dt.*** к этому интервалу:

$$F\text{^} = dwidf.$$

dim Fш=L2MT-^ единица — ватт (W, Вт).

Ватт равен потоку энергии ионизирующего излучения, при котором через данную поверхность за 1 с проходит излучение с энергией 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нВТ; мкВт; мВт; Вт; кВт; МВт.

Перенос (флюенс) энергии ионизирующего излучения Ф® — отношение энергии ионизирующего излучения ***dw,*** проникающего в элементарную сферу, к площади ***dS*** центрального сечения этой сферы;

'dim единица — джоуль на квадратный метр (J/m2; Дж/м2).

Джоуль на квадратный метр равен переносу '(флюенсу) энергии ионизирующего излучения, при котором в сферу с площадью центрального сечения 1 м® проникает излучение с энергией 1 Дж.

Предпочтительные единицы: фДж/см^; пДж/см^; нДж/см^; мкДж/см^; мДж/см^; Дж/см^; кДж/см2; МДж/см2.

Плотность потока энергии ионизирующего излучения Ф» — отношение потока энергии ионизирующего излучения dFw, проникающего в элементарную сферу, к площади ***dS*** центрального сечения этой сферы:

$$dS \qquad dt \qquad dS\text{-}dt \qquad '$$

dim фш=MT~®, единица — ватт на квадратный метр (W/m^; Вт/м^).

Ватт на квадратный метр равен плотности потока энергии ионизирующего излучения, при которой в сферу с площадью центрального сечения 1 м^ за 1 с проникает излучение с энергией 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нВт/см^г мкВт/см=; мВт/см2; Вт/см=; кВт/см^: МВт/см=.

Величины и единицы, характеризующие взаимодействие ионизирующего и.злучения с веществом

Сечение взаимодействия ионизирующих частиц (сечение взаимодействия) а,- отношение числа щ определенного (i-го) типа взаимодействий ионизирующих частиц и частиц-мишеней в элементарном объеме при переносе Ф ионизирующих частиц к числу ***N*** частиц-мишеней в этом объеме и к этому переносу:

$$\text{Or} \quad \frac{\text{Щ}}{\text{ФЫ}} \text{-}$$

dim 0i=L^ единица — квадратный метр (т^; м^).

Квадратный метр равен сечению взаимодействия ионизирующих частиц, при котором в веществе, содержа^ щем одну частицу-мишень в 1 м^ перенос падающих частиц 1 м-2 приводит в среднем к одному акту взаимодействия определенного типа в 1 м®.

Предпочтительная единица: фм^.

Полное сечение взаимодействия ионизирующих час^ тиц (полное сечение взаимодействия) 0 — сумма всех сечений взаимодействия аi ионизирующих частиц данного вида, соответствующих различным реакциям **или** процессам:

dim 0=L^ единица — квадратный метр (m^; м^).

Квадратный метр равен полному сечению взаимодействия ионизирующих частиц, при котором в веществе, содержащем одну частицу-мишень в 1 м®, перенос падающих частиц 1 М-® приводит в среднем к одному акту взаимодействия в 1 м^.

Предпочтительная единица: фм^.

Макроскопическое **сечение взаимодействия ионизирующих** частиц (макроскопическое сечение взаимодействия) **Si** — произведение сечения взаимодействия a,- на концентрацию С частиц-мишеней в веществе:

dim единица — метр в минус первой степени

Предпочтительная единица: см"'.

Линейный коэффициент ослабления ц —отношение доли ***dN/N*** косвенно ионизирующих частиц, испытавших взаимодействие при прохождении элементарного пути ***dl*** в веществе, к длине этого иути:

dim n—L-', единица—метр в минус первой степени (т~"; м-').

Метр в минус первой степени равен линейному коэффициенту ослабления, при котором на пути 1 м плотность потока в параллельном пучке косвенно ионизирующих частиц уменьшается в е раз (е — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица: см"'.

Массовый коэффициент ослабления |Лtr — отношение линейного коэффициента ослабления к плотности р вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\_ J 1\_\_\_\_\_1\_ \quad \frac{dN}{p \sim P^V dl} .$$

dim единица — квадратный метр на килограмм (mVkg; м^/кг).

Квадратный метр на килограмм равен массовому коэффициенту ослабления, при котором на пути в 1 м в веществе с плотностью 1 кг/м® плотность потока в параллельном пучке косвенно ионизирующих частиц уменьшается в е раз (е —основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица: см7г.

Атомный коэффициент ослабления Ца—отношение линейного коэффициента ослабления ц к концентрации С атомов вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$" \quad \frac{dN}{C \sim CN\ dl} .$$

dim единица — квадратный метр (т^; м^).

Предпочтительнаи единица: см^.

Линейный коэффициент передачи энергии (itr — отношение доли энергии ***dw/w*** косвенно ионизирующего излучения (исключая энергию покоя частиц), которая преобразуется в кинетическую энергию заряженных частиц при прохождении элементарного пути ***dl*** в веществе, к длине этого пути;

$$1 \quad \frac{dw}{\quad} .$$

dim n.tr=L-', единица — метр в минус первой степени (т-';м-«).

Метр в минус первой степени равен линеиному коэффициенту передачи энергии, при котором в веществе на пути **1 м** плотность потока энергии косвенно ионизирующего излучения уменьшается в е раз (е — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица: **см-'.**

Массовый коэффициент передачи энергиир,,,^ — отношение линейного коэффициента передачи энергии ^tr к плотности р вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\frac{Rr}{f^tr.}$$

dim titr.m=L2M-', единица — квадратный метр на килограмм (m2/kg; м7кг).

Квадратный метр на килограмм равен массовому коэффициенту передачи энергии, при котором на пути 1 м в веществе с плотностью I кг/м^ плотность потока энергии косвенно ионизирующего излучения уменьшает **в** е раз (е — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица: см7г.

Линейный коэффициент поглощения энергии Цеп — произведение линейного коэффициента передачи энергии Utr на разность между единицей и долей ***g*** энергии вторичных заряженных частиц, переходящей в тормозное излучение в данном веществе:

$$= \quad \textbf{(1 — g)".}$$

dim jxen=L-i, единица —метр в МИНУС первой степени **(т-'; М-").**

Предпочтительная единица: см"'.

Массовый **коэффициент поглощения энергии р**cn,m — отношение линейного коэффициента поглощения энергии Цеп к плотности р вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\frac{R r (1 - g)}{f^en.}$$

dim Hen,m=L2M-', единица — квадратный метр на килограмм (m^/kg; м7кг).

Предпочтительная единица: см7г.

Средний линейный пробег заряженной ионизующей частицы *R* — среднее значение модуля вектора между началом и концом пробега заряженной ионизующей частицы в данном веществе; dim R=L, единица — метр (ю; м).

Предпочтительные единицы: мкм; мм; см; м.

Средний массовый пробег заряженной ионизующей частицы ***Rm*—** произведение среднего линейного пробега ***R*** заряженной ионизующей частицы в данном веществе на плотность р этого вещества:

dim единица — килограмм на квадратный метр (kg/m^; кг/м^).

Предпочтительная единица: г/см^.

Линейная плотность ионизации t —отношение числа ***dn*** ионов одного знака, образованных заряженной ионизующей частицей на элементарном пути ***dl,*** к этому пути:

$$t = dn/dli$$

dim единица — метр в минус первой степени (т-'; м-').

Предпочтительные единицы: см"'"; мкм-'.

Линейная тормозная способность вещества S — отношение энергии ***dE*** теряемой заряженной ионизующей частицей при прохождении элементарного пути ***dl*** в ве-

ществе, к длине этого пути:

$$S = dE/dV,$$

dim S=LMT-^, единица — джоуль на метр (J/m; Дж/м).

Предпочтительная единица: кэВ/мкм.

Массовая тормозная **способность вещества** ***Sm-*** отношение линейной тормозной способности ***S*** вещества к плотности р вещества:

$$5 = A = J_ J L ;$$

dim S,n=L4-\ единица —джоуль-метр в квадрате на килограмм (J-m2/kg; Дж-м7кг).

Предпочтительные единицы: кэВ-см7г; МэВ-см^/г.

Атомная тормозная способность вещества Sa — отношение линейной тормозной способности ***S*** вещества к концентрации ***C*** атомов этого вещества:

$$C \sim C \quad dl$$

dim Sa==L^MT-2, единица — джоуль-квадратный метр (J-m^; Дж-.м2).

Предпочтительная единица: эВ-см^.

Линейная передача энергии (ЛПЭ) **LA** — отношение энергии dEA , переданной веществу заряженной частицей вследствие столкновений на элементарном пути ***dl,*** к длине этого пути:

$$L^^dE^/dl;$$

dim Li =LMT-2, единица — джоуль на метр (J/m; Дж/м).

Предпочтительная единица: кэВ/мкм.

Средняя энергия ионообразования ***W*** — отношение начальной кинетической энергии ***E*** заряженной ионизующей частицы к среднему числу пар иоиов ***N,*** образованных этой частицей до полной потери ее кинетической энергии в данном веществе:

$$W=E/N;$$

dim единица — джоуль (J; Дж).

Предпочтительная единица: эВ.

Массовая поверхностная плотность ps — отношение массы ***dm*** вещества элемента слоя **с** площадью ***dS*** поверхности к этой площади:

$$P^ = dm/dS;$$

dim ps=ML-^ единица — килограмм на квадратный метр (kg/m=; кг/м^).

Килограмм на кёд оратный метр равен массовой поверхностной плотности, при которой на 1 м^ поверхности слоя равномерно распределена масса 1 кг.

Предпочтительные единицы: мг/см^; г/см^.

Дозиметрические величины и единицы

Поглощенная доза ионизирующего излучения (доза излучения) ***D*** — отношение средней энергии ***dw,*** переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе ***dm*** вещества в этом объеме:

$$D = dm/dw,$$

dim Z)=L2T-2, единица —грэй (Gy; Гр)".

Грэй равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нГр; мкГр; мГр; Гр; кГр; МГр,

Мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения (мощность дозы излучения) Ь — отношение приращения поглощенной дозы ***dD*** за интервал времени ***dt*** к этому интервалу времени:

$$b = dD/di;$$

dim D= единица —грэй **в** секунду (Gy/s; Гр/с).

Грэй в секунду равен мощности поглощения дозы излучений, при которой за 1 с в веществе создается доза излучения 1 Гр.

Предпочтительные единицы: мГр/мин; Гр/мин; мГр/с; Гр/с; кГр/с.

Керма К— отношение суммы начальных кинетических энергий df,, всех заряженных ионизиру»шКх частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе ***dm*** вещества в этом объеме:

$$K=dEJdm;$$

dim единица — грэй (Gy; Гр).

Грэй равен керме, при которой сумма начальных кинетических энергий всех заряженных ионизующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в веществе массой 1 кг, равна 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нГр; мкГр; мГр; Гр; кГр; МГр.

Мощность кермы /< — отношение приращелия кермы ***dK*** за интервал времени ***dt*** к этому интервалу времени:

$$dK/dt;$$

dim единица — грэй в секунду (Gy%; Гр/с).

Грэй в секунду равен мощности кермы, при которой **в** веществе за **1** с создается керма **1** Гр.

Предпочтительные единицы: мГр/мин; Гр/мин; мГр/с; Гр/с; кГр/с.

Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза) ***X*** — отношение суммарного заряда ***dQ*** всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой ***dm,*** полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме:

$$X = dQIdm:$$

dim X=M-Ч1, единица — кулон на килограмм (C/ivg; Кл/кг).

Кулон на килограмм равен экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в воздухе массой 1 кг, производят ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака.

Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения (мощность экспозиционной дозы) X —отношение приращения экспозиционной дозы ***dX*** за интервал времени ***di*** к этому интервалу времени:

$$X = dX/dt;$$

dim X==M-Ч, единица — ампер на килограмм {A-lkg; А/кг).

Ампер на килограмм равен мощности Эгхпотщионной дозы фотонного излучения, при которой за 1 с создается экспозиционная доза 1 Кл/кг.

Примечание. В процессе перехода на единицы СИ физические величины экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы подлежат изъятию из употребления.

Эквивалентная доза ионизирующего излучения (эквивалентная доза) ***H*** — произведение поглощенной дозы ***D*** на средний коэффициент качества k ионизирующего пзлу-

чения в данном элементе объема биологической ткани стандартного состава:

$$H = Dk;$$

dim H—UT-", единица — зиверт (Sv; За).

Зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 1 Дж/кг.

Предпочтительные единицы: мкЗв; мЗв.

Мощность эквивалентной дозы ионизирующего излучения (мощность эквивалентной дозы) ***Й*** — отношение приращения dH эквивалентной дозы за интервал времени ***dt*** к этому интервалу времени:

$$H = dH/dt;$$

dim единица — зиверт в секунду (Sv/s; Зв/с)_.

Зиверт в секунду равен мощности эквивалентной дозы, при которой за 1 **с** создается эквивалентная доза 1 Зв.

Предпочтительная единица: мкЗв/ч.

Величины и единицы, характеризующие источники ионизирующих излучений

Активность радионуклида в источнике (образце) (активность радионуклида) ***А*** — отношение числа ***dN*** спонтанных переходов из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида, происходящих в источнике (образце) за интервал времени ***dt,*** к этому интервалу времени:

$$A-=dN/dt;$$

dim A=T-', единица — беккерель (Bq; Бк).

Беккерель равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором за время 1 **с** происходит один спонтанный переход из определенного ядерно-энергетического состояния этого радионуклида.

Предпочтительные единицы: Бк; кБк; МБк; ГБк; ТБк; ПБк.

Удельная активность источника *Am* — отношение активности ***А*** радионуклида в источнике (образце) **к** массе т источника (образца) или **к** массе элемента, соединения:

dim Лт=М-Ч-', единица — беккерель на килограмм (Bq/1{g; Бк/кг).

Беккерель на килограмм равен удельной активности источника, при которой активность радионуклида в источнике (элементе, соединении) массой в 1 кг равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/г; кБк/г; МБк/г; ГБк/г; ТБк/г.

Объемная активность источника *Av* — отношение активности ***А*** радионуклида в источнике (образце) к его объему V:

dim единица —- беккерель на кубический метр (Bq/mS; Бк/м®).

Беккерель на кубический метр равен объемной активности источника, при которой активность радионуклида в источнике объемом 1 м» равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/мл; кБк/мл; МБк/мл; ГБк/мл; БК/л; кБк/л; МБк/л; Бк/м®.

Молярная активность источника Лто! — отношение активности ***А*** радионуклида в источнике (образце) к числу молей ***N*** вещества (соединения), содержащего данный радионуклид:

$$Лто1 = AlN-,$$

dim Лто1=Т-'К-*, единица — беккерель на моль (Bq/mol; Бк/моль).

Беккерель на моль равен молярной активности, при которой в источнике (соединении), содержащем 1 моль радиоактивного вещества (соединения), активность равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы. МБк/моль; ГБк/моль; МБк/ммоль; ГБк/м.моль; ТБк/ммоль.

Поверхностная активность источника *As* — отношение активности ***А*** радионуклида в источнике (образце), распределенной на поверхности источника, к площади ***S*** этой поверхности:

$$As = A/S;$$

dim единица — беккерель на квадратный метр (Bq/m^; Бк/м').

Беккерель на квадратный метр равен поверхностной активности, при которой активность радионуклида (радионуклидов), распределенного на поверхности площадью 1 м®, равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/см^; кБк/см2; МБк/км^; ГБк/км^.

Постоянная мощности воздушной кермы радионуклида (керма-постоянная) Г^ — отношение мощности воздушной кермы , создаваемой фотонами с энергией больше заданного порогового значения б от точечного изотропно-излучающего источника данного радионуклида, находящегося в вакууме на расстоянии I от источника, умноженной на квадрат этого расстояния, к активности Л источника:

$$Г^ = Kг IVA;$$

dim Tg единица — грэй-метр в квадрате в секунду-беккерель (Gy-mV(s-Bq); Гр-м7(с-Бк)).

Грэй-метр в квадрате в секунду-беккерель равен постоянной мощности воздушной кермы радионуклида, при которой мощность воздушной кермы, создаваемой фотонным излучением с энергией больше б, точечного изотропно-излучающего источника активностью 1 Бк в вакууме на расстоянии 1 м равна I Гр/с.

Предпочтительная единица: аГр•м^/ /(с-Бк).

Керма-эквивалент источника Ае — мощность воздушной кермы фотонного излучения с энергией фотонов больше заданного порогового значения б точечного изотропно-излучающего источника, находящегося в вакууме, на расстоянии I от источника, умноженная на квадрат этого расстояния:

dim единица — грэй-метр в квадрате в секунду (Gym^/s; Гр-м^/с).

Грэй-метр в квадрате в секунду равен керма-эквиваленту источника, при котором точечный изотропно-излучающий источник фотонов с энергией фотонов, большей б, создает в вакууме на расстоянии 1 м мощность воздушной кермы I Гр/с.

Предпочтительные единицы: нГр•м®/с; мкГр-м^с; мГр-м^/с; Гр-м^/с.

Постоянная радиоактивного распада радионуклида % — отношение доли ядер ***dNjN*** радионуклида, распадающихся за интервал времени ***dt,*** к этому интервалу времени:

$$\sim N \quad dt \quad '$$

dim X=T-i, единица — секунда в минус первой степени (s->; с-').

Секунда в минус первой степени равна постоянной распада, при которой за 1 с число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в е раз (е —основание натурального логарифма).

Предпочтительные единицы: с"'; мин-'; ч-'; сут-'; год-'.

Период полураспада радионуклида J,/2 — время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в 2 раза; dim Tiii=T, единица — секунда (s, с).

Предпочтительные единицы: с; мин; ч; сут; год.

Средняя продолжительность жизни радионуклида т — время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в е раз (е —основание натурального логарифма); dim ***x=T,*** единица—секунда {s; с).

Предпочтительные единицы: с; мин; ч; сут; год.

О порядке внедрения ГОСТ 8.417—81 в области измерения ионизирующих излучений

Методическими указаниями РД 50—454—84 установлен следующий порядок внедрения ГОСТ 8.417—81 в области ионизирующи;их излучений:

1. Предусматривается постепенное внедрение единиц СИ, т. е. допускается определенный переходный период, продолжительность которого определяется программами мероприятий по внедрению единиц СИ, разработанными министерствами и ведомствами СССР.

2. Учитывая широкое использование в различных отраслях народного хозяйства таких единиц, как рентген, рад, бэр и кюри, устанавливается единый для всех министерств и ведомств СССР переходный период до 1 января 1990 г.

3. Во время переходного периода в научно-технической документации (НТД) и различных публикациях следует указывать значения поглощенной дозы, эквивалентной дозы, кермы, активности и производных от них величин в единицах, приведенных в Методических указаниях РД 50-454-84 в качестве предпочтительных, помещая в скобках, в отдельных графах таблиц, в примечаниях или сносках, иа параллельных шкалах графиков значения этих величин во внесистемных единицах.

4. В программах мероприятий следует предусмотреть, что с 1 января 1990 г. все приборы для измерения величин, указанных в п. 3, рекомендуется градуировать в предпочтительных единицах.

5. Имея в виду постепенный отказ от практического использования экспозиционной дозы и ее мощности, во время переходного периода их значения указываются во внесистемных единицах (Р, Р/с или в соответствующих дольных или кратных единицах). Значения этих величин в единицах СИ (Кл/кг, А/кг или в соответствующих десятичных дольных и кратных единицах) приводить не следует. Отмеченное выше распространяется и на использование гамма-постоянной (постоянная мощности экспозиционной дозы). Использование экспозиционной дозы и ее мощности после I января 1990 г. не рекомендуется.

6. С введением Методических указаний РД 50—454—84 должна быть прекращена разработка новых приборов для измерения экспозиционной дозы и ее мощности.

7. Считать целесообразным постепенную замену приборов для измерения экспозиционной дозы и ее мощности приборами для измерения поглощенной дозы, кермы, эквивалентной дозы и их мощности, увязав общие технические требования к этой аппаратуре с рекомендациями международных организаций.

1.4. МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ И ИХ НАИМЕНОВАНИЯ

Множитель	Приставки	Обозначение приставки		Множитель	Приставки	Обозначение приставки	
		международное	русское			международное	русское
1018	экса	E	**Э**	10-1	деци	d	д
101®	пета	P	**П**	10-^	санти	c	с
1012	тера	T	Т	10-3	МИЛЛИ	m	
10=>	гига	G	г	10-«	микро	μ	мк
10"	мега	M	**М**	10-9	нано	n	н
10=	кило	к	к	10-12	пико	p	п
10^	гекто	h	г	10-15	фемто	f	ф
101	дека	da	да	10-1«	атто	a	

Примечания: **1. В** соответствии **с** международным стандартом **исо 31**/0-74 десятичные кратные и дольные единицы не являются единицами СИ.

2. Приставки гекто, дека, деци и санти допускается применять только в наименованиях кратаых и дольных единиц, уже получивших широкое распространение {гектар, декалитр, дециметр, сантиметр и др.).

При сложном наименовании производной единицы СИ приставку присоединяют к наименованию первой единицы, входящей в произведение или числитель дроби. Например, кПа-с/м, но не Па-кс/м.

В виде исключения из этого правила временцо в обоснованных случаях, т. е. в случаях, когда это нашло широкое распространение, допускается присоединение приставки к наименованию единицы, входящей в знаменатель дроби. Например, кВ/см, А/мм, Бк/мл, кэВ/мкм.

Выбор десятичной кратной или дольной единицы оя-единицы СИ диктуется прежде всего удобством ее применения. Из многообразия кратных и дольных единиц, которые могут быть образованы при помощи приставок, выбирают единицу, приводящую к числовым значениям величины, приемлемым на практике. В принципе кратные и дольные единицы выбирают таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000. В табл. 1.12 приведены рекомендуемые для применения кратные и дольные единицы от единиц СИ.

Для снижения вероятности ошибок при расчетах десятичные кратные и дольные единицы рекомендуется подставлять только в конечный результат, а в проц:есе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10.

Кроме десятичных кратных и дольных единиц допущены к использованию кратные и дольные единицы времени, плоского угла и относительных величин, не являющиеся десятичными. Например, единицы времени (минута, час, сутки), единицы плоского угла (градус, минута, секунда).

1.5. ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ, ДОПУСКАЕМЫЕ К ПРИМЕНЕНИЮ НАРАВНЕ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Навменование величины	Наименование	Единица		Соотношение с единицей СИ
		Обозначение		
		международное	русское	
Масса	тонна	t	т	103 кг
	атомная единица массы	U	а. е. м.	1,66057-10-2' кг (приблизительно)
Время*1	минута	min	'МИН	60 с
	час	h	ч	3600 с
	сутки	d	сут	86400 с
Плоский угол	градус	...<'		(л/180) рад = 1,745329-10-2 рад
	минута			(л/10 800) рад = 2,908882 . . . -10-* рад
	секунда			(71/648000) рад = 4,848137 . . .-Ю-" рад
	град*2	g ... (gon)	град	(я/200) рад
Объем, вместимость*^	литр	l	л	10-3 мз
Длина	астрономическая единица	u. a.	а. е.	1,45598-10" м (приблизительно)
	световой год	iy	св. год	9,4605-101® м (приблизительно)
	парсек	pc	ПК	3,0857-10" м (приблизительно)
Оптическая сила	диоптрия	—	дптр	1 м-1
Площадь	гектар	ha	га	10* м2
Энергия	электрон-вольт	eV	эВ	1,60219-10-" Дж (приблизительно)
Полная мощность	вольт-ампер	V-A	В-А	
Реактивная мощность	вар	var	вар	

Допускается также применять другие единицы, полу широкое распростран ние, например неделя, месяц, год, числение и т. п.

Допускается применять по-русски наименование «гои».

Не Рекомендуется применять при точных измерениях. При возможности обозначения I с цифрой допускается обозначние /.

Примечание. Единицы времени (минуту, час, сутки), плоского угла (градус, минуту, секунду), астроно ую единицу, световой год, диоптрию и атомную единицу массы не допускается применять с приставками.

1.6. ПЕРЕЧЕНЬ НЕКОТОРЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ И ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ ЕДИНИЦ

Наименование				
1. Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную) КПД, относительное удлинение, относительная плотность, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, магнитная воспр1!имчивость, массовая доля, молярная доля и т. п.	единица (число 1)			
	процент	%	10-3	
	промилле	%%		
	миллионная доля	ppt	10-e	
2. Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную):		1 B=:\g{P2/Pi) при Pa == 1OPi, 1 B=2Jg_(F,/Fi) при = У 10 Fi		Pi, P2—одноименные энергетические величины (мощности, энергии, плотности энергии и т. п.) Fi, F2 — одноименные «силовые» величины (напряжения, силы тока, давления, напряженности поля и т. п)

Продолокение табл. 3.42

Наименование величины	Единица				Примечание
	Наименование	Обозначение		Определение	
		международное	русское		
уровень звукового давления, усиление, ослабление и т.	децибел	dB	дБ	**0,1 Б**	
3. То же, уровень громкости	фон	phon	фон	**1 фон равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 Гц равен 1 дБ**	-
4. То же, частотный интервал	октава			**1 октава равна logs (/2//1) при /2//1=2**	/1, —частоты
	декада	-	-	**1 декада равна 1g(/2//i) при /a//1=10**	

В соответствии с публикацией 27—3 Международной электротехнической комиссии (МЭК) при необходимости указать исходную величину, ее значение помещают в скобках после обозначения логарифмической величины, например для уровня звукового давления i (rerOp-Pa) =20dD; ip (re20 мкПа) =20 дБ (re — начальные буквы слова reference, т. е. исходный). При краткой форме записи значение исходной величины указывают в скобках после значений уровня, например 20 дБ (re ЭОр-Ра) или 20 дБ (re 20 мкПа).

1.7. ЕДИНИЦЫ, ВРЕМЕННО ДОПУСКАЕМЫЕ К ПРИМЕНЕНИЮ

Наимевовавие i	Единица			Соотношение с единицей СИ	Примечание
	Наименование	Обозначение			
		международное	русское		
Длина	Морская миля	-	миля	1852 м (точно)	В морской навигации
Масса	карат	-	кар	2-10-® кг (точно)	Для драгоценных камней и жемчуга
Линейная плотность	текс	tex	текс	10-« кг/м (точно)	В текстильной промышленности
Скорость	узел	кп	уз	0,514 (4) м/с	В морской навигации
Частота вращения	оборот в секунду	.	об/с	1 с-1	-
	оборот в минуту		об/мин	1/60 с-1 = 0,016 (6)0-1	
Давление	бар	bar	бар	IQB Па	
Натуральный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физическом величине, принимаемом за исходную	епер	Np	Нп		1 Np = 0,8686. . . B = = 8,686 . . . dB

временно допускается применять до принятия по соответствующих международных решений.

1.8. СООТНОШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Наименование вели»	Наименование			Соотношение с единицей СИ
Длина	ангстрем	A	A	10-W м
	икс-единица	X	икс-ед	1,00206- 10-м м (приблизительно)
Площадь	барн	Ь	6	10-28 м^
Масса	центнер		Ц	100 кг
Телесный угол	квадратный градус			3,0462... 10-« ер
Ускорение	гал	Gal	Гал	0,01 м/с2
Сила, вес	дина	din	дин	10-Б Н
	килограмм-сила		кгс	9,80665 Н (точно)
	килопонд			9,80665 Н »
	грамм-сила	*if*	гс	9,80665 • 10-3 Н (точно)
	понд			9,80665 • 10-3 и (точно)
	тонна-сила	t?	тс	9806,65 Н (точно)
Давление	килограмм-сила на квадратный сантиметр	kgf/cni2	кгс/см^	98066,5 Па (точно)
				98065,5 Па (точно)
	килопонд на квадратный сантиметр	кр/сгп2		98065,5 Н (точно)
	миллиметр водяного столба	mm H2O	ММ вод. ст.	9,80665 Па (точно)
	миллиметр ртутного столба	mm Hg	мм рт. ст.	133,322 Па (точно)
	торр	Торг		133,322 Па (точно)
Напряжение (механическое)	килограмм-сила на квадратный миллиметр		кгс/мм^	9,80665 - 10в Па (точно)
	килопонд на квадратный миллиметр	kp/mrn^		9,80665 • 10в Па (точно)
Работа, энергия	эрг			10-' Дж
Мощность	лошадиная сила		л. с.	735,499 Вт
Динамическая вязкость	пуаз	Р	П	0,1 Па-с
Кинематическая вязкость	стокс	St	Ст	10-4 м2/с
Удельное электрическое сопротивление	ом-квадратный миллиметр на метр	***S mnf/m***	ОМ-ММVМ	10-е Ом • м
Магнитный поток	максвелл	МХ	Мкс	10-8 Вб
Магнитная индукция	гаусс	Gs	Гс	10-^ Тл
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	гильберт	Gb	Гб	10/(471) А = 0,795775 ... А
Напряженность магнитного поля	эрстед			10з/(4г.) А/м=79,5775 ... А/м
Количество теплоты, термодинамический потенциал (внутренняя энергия, энтальпия, изохорно-изотермический потенциал), теплота фазового превращения, теплота химической реакции	калория (межд.)	cal	кал	4,1868 Дж (точно)
	калория термохимическая	calth	калтх	4,1840 Дж (приблизительно)
	калория 15-градусная			4,1855 Дж (приблизительно)
Поглощенная доза излучения		rad, rd	рад	0,01 Гр
Эквивалентная доза излучения, показатель эквивалентной дозы		rem	бэр	0,01 Зв
Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза 7-и рентгеновского излучения)				2,58 • 10-^ Кл/кг (точно)
Активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри			3,700 • 101" Бк (точно)
Длина	микрон			Ю-» м
Угол поворота	оборот			2я рад = 6,28 ... рад
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	ампер-виток			1 А
Яркость	нит			1 кд/м2
Площадь	ар			100 м^

1.9. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМАХ СГС И СИ

Наименование величины	Соотношение между единицами
Сила электрического тока	1 ^
Количество электричества. Электрический заряд	1 СГС (СГСЭ) = 3,33564.10-10 Кл 1 СГСМ = 10 Кл
Поверхностная плотность электрического заряда	1 СГС (СГСЭ) =3,33564-10-8 Кл/м^ 1 СГСМ= 106 Кл/м2
Пространственная плотность электрического заряда	1 СГС (СГСЭ) =3,33564-10-4 Кл/м^ 1 СГСМ = 1-107 Кл/мз
Напряженность электрического поля	1 СГС (СГСЭ) = 2,997825.10* В/м 1 СГСМ= ЫО-в В/м
Электрическое напряжение, электрический потенциал, **ЭДС**	1 СГС {СГСЭ) = 2,997925-102В I СГСМ = 1.10-8 В
Поток электрического смещения	1 СГС (СГСЭ) = 2,65442-10-" Кл 1 СГСМ = 795775 Кл
Электрическое смещение	1 СГС (СГСЭ)= 2,65442.10-' Кл/м''
Электрическая ёмкость	1 СГСМ = 0,795775.103 Кл/м^ 1 СГС (СГСЭ) = 1,11265.10-12 ф **1 сгсм = ЬЮ» Ф**
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	1 СГС (СГСЭ) = 8,854187.10-12 ф/м 1 СГСМ = 7,95775.10» Ф/м
Электрический момент диполя	1 СГС (СГСЭ) =3,33564.10-12 Кл-м I СГСМ=0,1 Кл-м
Плотность электрического тока	1 СГС (СГСЭ) =3,33564.10-8 А/м^ I СГСМ = 1.10В А/м2
Линейная плотность электрического тока	1 СГС (СГСЭ) =3,33564-10-8 А/м 1 СГСМ =1.103 А/м
Напряженность магнитного поля	1 СГС (СГСМ), эрстед (Э) =79,5775 А/м 1 СГСЭ = 2,65442.10-8 А/м
Магнитодвижущая сила. Разность магнитных потенциалов	1 СГС (СГСМ), гильберт (Гб) = 0,795775 А 1 СГСЭ = 2,65442-10-11 А
Магнитная индукция	I СГС (СГСМ), гаусс (Гс) = Ы О - Ч л 1 СГСЭ = 2,997925.106
Магнитный поток	1 СГС (СГСМ), максвелл (Мкс) = l-1Q-s Вб I СГСЭ = 299,7925 Вб
Индуктивность. Взаимная индуктивность	I СГС (СГСМ)= МО-s Гн 1 СГСЭ = 8,98755.101 Гн
Абсолютная магнитная проницаемость	1 СГС (СГСМ) = 1,256637.10-8 Гн/м I СГСЭ= 1,1294Ы0« Гн/м
Магнитный момент (амперовский)	1 СГС (СГСМ) = **ЫО-з** А.м^ 1 СГСЭ = 3,33564.10-W А.м2
Магнитный момент (кулоновский)	1 СГС (СГСМ) = 1.10-10 Вб/м I СГСЭ = 2,997925 Вб-м
Намагниченность	1 СГС (СГСМ) = 1.103 А/м I СГСЭ = 3,33564.10-8 А/м
Электрическое сопротивление	I СГС (СГСЭ) = 8,98755.10" Ом 1 СГСМ = 1-10-8 Ом
Электрическая проводимость	1 СГС (СГСЭ) = 1,11265.10-12 См 1 СГСМ = МО" См
Удельное электрическое сопротивление	1 СГС (СГСЭ) = 8,98755-10» Ом-м 1 СГСМ = 1.10-11 Ом.м
Удельная электрическая проводимость	1 СГС (СГСЭ) = 1-11265.10--= См/м I СГСМ= МОИ См/м
Магнитное сопротивление	1 СГС (СГСМ) = 79,5775.10« А/Вб 1 СГСЭ = 8,854186.10-1* А/Вб
Магнитная проводимость	1 СГС (СГСМ) = 1,256637.10-3 Вб/**А** I СГСЭ = 1,12941.1013 Вб/А

1.10. СООТНОШЕНИЯ ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ РАДИОАКТИВНОСТИ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Наименование величины	Внесистемные единицы			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Плотность потока ионизирующих частиц	сантиметр в минус второй степени-час в минус первой степени		СМ-2-4-1	2,778-м-2 с-1
Интенсивность излучения	**эрг-сантиметр в минус второй степени-секунда в минус первой степени**	erg.(cm-2.s-i)	ЭрГ-(СМ-2-С-1)	10-3 Вт/м^
	эрг-сантиметр в минус второй степени-минута в минус первой степени	erg.(cm-2-min-i)	эрг.{см-2.мин-1)	1,667-10-6 Вт/м^
	эрг-сантиметр в минус второй степени-час в минус первой степени	erg.(cm-2.h-i)	эрг .(см-^-4-1)	2,778.10-' Вт/м2
Поглощенная доза излучения	эрг-грамм в минус первой степей 11	erg-g-i	эрг-г-'	10-* Дж/кг
	рад	rad	рад	0,01 Гр
Мощность поглощенной дозы излучения	эрг-грамм в минус первой степени-секунда в минус первой степени	erg.(g-i.s-i)	эрг.(г-1 -с-i)	10-® Вт/кг
	рад-секунда в минус первой степен 11	rad-s-i	рад-0-1	0,01 Гр/с
	рад-час в минус первой степени	rad-h-i	рад-ч-1	2,778.10-" Гр/с
Экспозиционная доза рентгеновского и излучений	рентген	R	Р	2,58.10"» Кл/кг
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и -{-излучений	рентген в секунду	R/s	Р/с	2,58.10-« А/кг
	рентген в минуту	R/min	Р/мин	4,3-10-е А/кг
	рентген в час	R/h	Р/ч	7,17-10-8 А/кг

СООТНОШЕНИЕ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ ЕДИНИЦ ХАРТРИ h И СИСТЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЕДИНИЦ c=m^=h С ЕДИНИЦАМИ СИ

Величина	Единица системы m , h, e	Единица системы т^, Ь, с
Длина	5,292 - 10-1' м	3,862 • 10-13 м
Время	2,419 • 10-" с	1,288 • 10-21 с
Площадь	2,800 . Ю-'-'i м2	1,491 • 10-26 м2
Скорость	2,188 W м/с	2,998 • 108 м/с
Ускорение	9,043- 10^2 м/с2	2,327 . 1029 м/с2
Масса	9,109 • I0-W кг	9,109 • 10-3' кг
Сила	8,237 - 10-8 Н	2,120 - 10-" Н
Импульс (количество движения)	1,993 • 10-2^ кг • м/с	2,731 - 10-22 кг • м/с
JMoMeHT силы	4,360- 10-18 И . м	8,187 • 10-" Н • м
Момент импульса (количество движения)	1,055 • 10-34 Лж • с	1,055 • 10-34 Дж • с
Работа, энергия	4,360 • 10-18 Дж	8,187 • 10-W Дж
Электрический заряд	1,602 10-1" Кл	1,876 • 10-18 Кл
Сила тока	6,624 - 10-3 А	1,456 • 103 А
Напряженность электрического поля	5,130 • 10" В/м	1,131 • 101' В/м
Потенциал	27,22 IB	4,366 • 104 В
Магнитная индукция	1,715. 103 Тл	3,771 • 108 Тл
Магнитный момент	2,542 • 10-21 А • м^	2,171 • 10-22 А • и-

1 12 РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ ОТ ЕДИНИЦ СИ И ОТ ЕДИНИЦ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НАРАВНЕ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Продолжение табл. 1.12

Часть I. Пространство и время

Плоский угол	мрад, мкрад
Длина	км, см, мм, мкм, нм
Площадь	км^, дм^, см^, мм^
Объем, вместимость	дм^, см3, мм®, гл, дл, сл, мл
	кс, мс, мкс, нс
Скорость	км/ч

Часть II. Периодические и связанные с ними явления

Частота периодического процесса	ТГц, ГГц, МГц, кГц

Часть III. Механика

	Мг, г, мг, мкг, Мт, кт, дт
Линейная плотность	мг/м, г/км
Плотность	Мг/м», lcг/дмЭ, г/смЭ, г/мл, г/л
Сила, вес	МН. кН, мН, мкН
Момент силы	МН • м, кН • м, мН-м, мкН. м
Давление	ГПа, МПа, кПа, гПа, даПа, мПа, мкПа
Напряжение	ГПа, МПа, кПа
Динамическая вязкость	МПа • с
Кинематическая вязкость	мм^/с
Поверхностное натяжение	мН/м
Энергия, работа	ТДж, ГДж, МДж, кДж, мДж, ГэВ, МэВ, кэВ
	ГВт, МВт, кВт, мВт, мкВт

Часть IV. Теплота

Температура	МК, кК, мК, мкК
Теплота, количество теплоты	ТДж, ГДж, МДж, кДж, мДж
Тепловой поток	кВт, мВт
Теплоемкость	кДж/К
Удельная теплоемкость	кДж/(кг . К)
Энтропия	кДж/К
Удельная энтропия	кДж/(кг • К)
Удельное количество теплоты	МДж/кг, кДж/кг
Удельная теплота фазового превращения	МДж/кг, кДж/кг

Часть V. Электричество и магнетизм

Электрический ток (сила электрического тока)	кА, мА, мкА, нА, пА
Количество электричества, электрический заряд	кКл, мкКл, нКл, пКл
Пространственная плотность электрического заряда	Кл/ммз, МКл/MS, Кл/см®, кКл/м3, МКЛ/М3, мкКл/мз
Поверхностная плотность электрического заряда	МКл/м2, Кл/мм2, Кл/см2, кКл/м2, МКл/MS МКЛ/М2
Напряженность электрического поля	МВ/м, кВ/м, В/мм, В/см, мВ/м, мкВ/м
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	МВ, кВ, мВ, мкВ, нВ
Электрическое смещение	Кл/см2, кКл/CN^, мКл/м^ мкКл/м®
Поток электрического смещения	МКл. кКл, мКл
Электрическая емкость	мФ, мкФ, нф, пф
Абсолютная диэлектрическая проницаемость, электрическая постоянная	мкф/м, нФ/м, пф/м
Поляризованность	Кл/см2, кКл/м^, мКл/м2, мкКл/м^
Плотность электрического тока	МА/м2, А/мм2, А/см^ кА/м2
Линейная плотность электрического тока	кА/м, А/мм, А/см
Напряженность магнитного поля	кА/м, А/мм, А/см
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	кА, мА
Магнитная индукция, плотность магнитиого потока	мТл, мкТл, нТл
Магнитный поток	мВб
Магнитный векторный потенциал	кТл • м
Индуктивность, взаимная индуктивность	мГн, мкГн, нГн, пГн
Абсолютная магнитная проницаемость, магнитная постоянная	мкГн/м, нГн/м
Намагниченность	кА/м, А/мм
Магнитная поляризация	мТл
Электрическое сопротивление	ТОм, ГОм, МОм, кОм, мОм, мкОм
Электрическая проводимость	кСм, мСм, мкСм
Удельное электрическое сопротивление	ГОм-м, МОм-м, кОм-м, Ом-см, мОм-м, мкОм-м, нОм-м
Удельная электрическая проводимость	МСм/м, кСм/м
Полное сопротивление	МОм, кОм, мОм
Полная проводимость	кСм, мСм
Активная проводимость	мкСм
Реактивная проводимость	кСм, мСм
Активная мощность	ТВт, ГВт, МВт, кВт, мВт, мкВт, нВт

Часть VI. Свет и связанные с ним электромагнитные излучения

Длина волны	
Волновое число	
Световая энергия	

Продолжение табл. 1.12

Наименование	
Часть VII. Акуст	
Период	мс, мкс
Частота периодического процесса	МГц, кГц
Длина волны	
Звуковое давление	мПа, мкПа
Скорость колебания частицы	
Поток звуковой энергии, звуковая мощность	кВт, мВт, мкВт, пВт
Интенсивность звука	мВт/м2. мкВт/м2, пВт/м2
Часть VIII. Физическая химия и молекулярная	
Количество вещества	кмоль, ммоль, мкмоль
Молярная масса	г/моль
Молярный объем	ДМЗ/мОЛЬ, см^/моль, л/моль
Молярная внутренняя энергия	кДж/моль
Молярная энтальпия	кДжУмоль
Химический потенциал	кДж/моль
Химическое сродство	кДж/моль
Молярная концентрация	кмоль/м», моль/л, моль/дмз
Удельная адсорбция	ммоль/кг
Час ***IX. Ионизирующие излучения***	
Поглощенная доза иачучения, керма, показа1ель поглощенной дозы (поглощенная доза ионизирующего излучения)	ТГр, ГГр, МГр, кГр, мГр, мкГр
Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность радионуклида)	ЭБк, ПБк, ТБк, ГБк. МБк, кБк

1.13. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Длина

Ангстрем (А, А)*'; 1 А=10-»°м

Астрономическая единица (и.а., а.е.); 1 а.е. = 1,49597870 X ХЮ" м
Дюйм (in, —); 1 дюйм=0,025 4 м (точно)
Икс-единица (X, икс-ед); 1 икс-ед= 1,00206-10-м
Кабельтов (—, —); 1 кабельтов= 185,2 м
Микрон (р., мк); 1 мк=М0-б м
Миля морская (n. mile, —); 1 миля морская=1852 м (точно)
Миля сухопутная (mile, —); 1 миля сухопутная= = 1609,344 м (точно)
Парсек (рк, ПК); 1 пк=3,085678.10'® м

В скобках даны международное и русское обозначения единиц. В случае отсутствия обозначения единицы вместо него сделан прочерк.

Световой год (1у, св. год); 1 св. год=9,490530-10" м
Ферми (—,—); 1 ферми=1-10-'''м
Фут (ft, —); 1 фут=0,3048 м (точно)
Ярд (yd,—); 1 ярд=0,9144 м (точно)

Площадь

Ар (а, а); 1 а=100 м^
Барн (Ь, б); 1 6=1-10-28 м^
Гектар (ha, га); 1 га=1-10^ м^
Квадратный дюйм (in^, —); 1 кв. дюйм=6,4516-10-^ м^^ (точно)
Квадратный фут (ft^, —); 1 кв. фут=9,29030-IQ-^ м^
Квадратный ярд (yd^ —^ 1 кв. ярд=0,83613 м^

Объем

Баррель (Великобрит.) (для сыпучих веществ) (—, —); 1 баррель (Великобрит.)=0,16365 м®
Баррель нефтяной (США) (—, —); 1 баррель нефтяной (США)=0,158988 м®
Баррель сухой (США) [bbl (US), —J; 1 баррель сухой (США)=0,115628 м®
Бушель (Великобрит.) (—, —); 1 бушель (Великобрит.) =3,63687-10-2 м®
Бушель (США) (bu,—); 1 бушель (США)=3,52393X Х10-2 m®
Галлон (Великобрит.) [gal (UK), —1 галлон (Великобрит.)=4,54609-10-^ м»
Галлон для жидкостей (США) [gal (US), —]; 1 галлон для жидкостей (США)=3,78543-10-3 м®
Галлон для сыпучих веществ (США) (—, —); 1 галлон для сыпучих веществ (США)=4,405-10-® м®
Дюйм кубический (in', —); 1 дюйм кубический= = 1,63871-10-5 м®
Литр (l, л); 1 л=ЫО-®м®
Лямбда *{-к. К);* 1 X=ЫО-'' м»
Пинта (Великобрит.) [pt (UK), —]; I пинта (Великобрит.)=5,68261 • 10-^ м®
Пинта для жидкостей (США) [lig pt (US), —]; 1 пинта для жидкостей (США) =4,73179-10-^ м»
Пинта для сыпучих веществ (США) [dry pt (US), —]; I пинта для сыпучих веществ (США)=5,50614X Х10-* м®
Унция (Великобрит.) [fl-oz (UK),]; 1 унция (Великобрит.)=2,841-Ю-^ м®
Унция (США) [fl-oz (US), —l; 1 унция (США=2,957х Х10-5 „3

Фут кубический (ft,—); 1 фут кубический=2,83168X

Ярд кубический (yd®, —); 1 ярд кубический=0,76455 м®

Плоский угол

Град, гон (...8, град); 1 град=0,01570796 рад
Градус ..."); Г=0,01745329 рад
Минута (../, ...'); 1'=2,908882-10-^ рад
Полный угол, оборот (—, об); 1 об=6,283185 рад
Прямой угол (... L.,...L); 1L =1,570796 рад
Румб в метеорологии (—, —); 1 румб в метеорологии=

Румб в морской навигации (—, —); 1 румб в морской навигации = 0,1963495 рад
Секунда (...",..."); 1"=4,848137-10"® рад

Телесный угол

Квадратный градус (•", •"); Ш°=3,0462-10-" ср
Полный телесный угол (—, —); 1 полный телесный угол=12,56637 ср

Время

Год (a, год); 1 год=3,15569259747• 10" с (на 1900 г., 100 лет год сокращается на 0,5305 с)
Минута (min, мин); 1 мин=60 с
Сутки (d, сут); 1 сут=86 400 с
Час (h, ч); 1 ч=3600 с

Температура

Градус Ранкина (°Ra, "Ra); ГНа=0,556 К
Градус Реомюра (°R, "R); 1°R=1,25 К
Градус Фаренгейта (°F, °F); ГР=0,556 К
Градус Цельсия (°С, °С); ГС=1 К

Скорость

Километр в час (km/h, км/ч); 1 км/ч=0,277 7 м/с
Миля в час (mile/h, —); 1 мили в час=0,44704 м/с (точно)
Узел морской (кп, уз); 1 уз=0,514444 м/с
Фут в секунду (ft/s, —); 1 фут в секунду=0,3048 м/с (точно)

Ускорение

Гал (Gal, Гал); 1 Гал=0,01 м/с=

Угловая скорость

Градус в секунду (7s, 7с); 17с=0,017453 3 рад/с
Полный угол в минуту (—, —); 1 полный угол в минут>'=0,1047197 рад/с
Полный угол в секунду (—, —); 1 полный угол в секунду^ 6,283185 рад/с
Прямой угол в секунду (L/s, I /с); 1L /с=1,57080 рад/с
Радиан в минуту (rad/min, рад/мин); 1 рад/мин=0,0166667 рад/с

Частота вращения

Оборот в минуту (—, об/мин); 1 об/мин=0,016 (6) с-*
Оборот в секунду (—, об/с); 1 об/с=1 с-'

Масса

Атомная единица массы (и, а.е.м.); 1 а.е.м,= 1,66056х кг
Гамма (Y, —), I гамма=ЫО-» кг
Грамм (g, г); 1 г=1 -IQ-® кг
Гран (gr, —); 1 гран=6,47989Ы0-5 кг
Карат (—, кар); 1 кар=2-10-' кг (точно)
Слаг (slyg, —); 1 слаг= 14,5939 кг
Техническая единица массы (—, т.е.м.); 1 т.е.м.= =9,8066 кг (точно)
Тоиина **(t,T);** 1 т=1000 кг
Тонна (Великобрит.) (ton, —); 1 тонна (Великобрит.) = = 1016,05 кг
Тонна короткая (Великобрит.) (sh. ton,—); 1 тонна короткая (Великобрит.) =907,185 кг
Унция аптекарская (oz apoth, —); 1 унция аптекарская= =31,1035-10-3 кг
Унция аптекарская (русская) (—, —); 1 унция аптекарская (русская) =2,986-10-2 кг
Унция торговая (oz, —); 1 унция торговая=28,3495х Х10-® кг
Унция тройская (oz tr, —); 1 унция тройская=31,1035 X Х10-3 и-
Фунт торговый (lb, —); 1 фунт торговый='0,45359237 кг
Фунт в системе рус. мер (—. —); 1 фунт в системе рус. мер = 0,40951241 кг
Фунт (США) [lb (US). —]; 1 фунт (США) = = 0,4533924277 кг
Центнер, кратная единица СИ (q, ц); 1 ц=100 кг
Центнер (Великобрит.) (cwt, —); 1 центнер (Велико-

Центнер короткий (Великобрит.) (sh. cwt, —); 1 центнер короткий=45,3592 кг

Плотность

Грамм на кубический дюйм (g/in^, —); I грамм на кубический дюйм=61,0 кг/м®
Грамм на кубический метр (—, г/м®); 1 г/м^^ЫО-^кг/м'
Грамм на кубический сантиметр (g^m^, г/см'); 1 = 1-10^ кг/мз
Грамм на кубический фут (g/ft®, —); 1 грамм на кубический фут=3,53-10-2 кг/мз
Грамм иа литр (g/1, г/л); 1 г/л=1 кг/м'
Унция на кубический дюйм (oz/in^, —); 1 унция на кубический дюйм = 1,73-10® кг/м®
Унции на кубический сантиметр (oz/cm®, —); 1 унция на кубический сантиметр=2,835-10^ кг/м®
Унция иа кубический фут (—, —); 1 унция иа кубический фут=1,0014 кг/м®
Фунт иа кубический фут (lb/ft®. —); 1 фунт иа кубический фут=16,0185 кг/м'

Линейная плотность

Текс (tex. текс); 1 текс=1 -10-® кг/м (точно)

Сила

Дина (din, дин); 1 дин=1-10-5 Н
Килограмм-сила (kgf, кгс); 1 кгс=9,80665 Н (точно)
Килопоид (кр, —); 1 килопонд=9,80665 Н (точно)
Паундаль (pdl, —); 1 паундаль=0,138255 Н (точно)
Понд (p, —); 1 понд=9,80665-10-з Н (точно)
Стеи (sn, сн); 1 си=ЫО3 Н
Тониа-сила (tf, тс); 1 тс=9,80665-10® Н (точно)
Фунт-сила (Ibf,—); 1 фуит-сила=4,44822 Н

Давление

Атмосфера техническая (at, ат); 1 ат=9,80665-10' Па (точно)
Атмосфера физическая (atm, атм); 1 атм=1,01325-10^ Па (точно)
Бар (bar, бар); 1 бар=М05 Па
Дина на квадратный сантиметр (din/cm^, дин/см^); 1 дин/см2=0,1 Па
Дюйм водяного столба (in H2O, —); 1 дюйм вод. ст.= =249,089 Па
Дюйм ртутного столба (in Hg, —); 1 дюйм рт. ст.=

Килограмм-сила на квадратный метр (kgf/m^, кгс/м^); **1** кгс/м2=9,80665 Па (точно)
Килограмм-сила на квадратный сантиметр (kgf/cm», кгс/'см2); 1 кгс/см2=9,80665-10^ Па (точно)
Килопоид иа квадратный сантиметр (кр/ст^, —); 1 килопоид на кв. см=9,80665-10^ Па (точно)
Миллиметр водяного столба (mm HjO, мм вод. ст.); 1 мм вод. ст.=9,80665 Па (точно)
Миллиметр ртутного столба (mm Hg, мм рт. ст.); 1 мм рт. ст.= 133,322 Па
Пьеза (pz, пз); 1 пз=ЫО® Па
Тонна-сила иа квадратный метр (tf/m^, тс/м^); 1 тс/м2= =9,80665-10^ Па (точно)
Торр (Торг, —); 1 торр= 133,322 Па

фунт-сила на квадратный дюйм (lbf/in^ —); 1 фунт-сила на кв. дюйм=6,89476-10® Па
Фут водяного столба (ft HjO, —); 1 фут вод. ст.= =2,98907.10= Па

Импульс (количество движения)

Грамм-сантиметр в секунду (g-cm/s, г-см/с); 1 г-см/с= = 1-10-= кг-м/с
Килограмм-сила-секунда (kgf-s, кгс-с); 1 кгс-с= =9,80665 кг-м/с
Тонна-метр в секунду (—, т-м/с); 1 т-м/с=1-10® кг-м/с

Момент силы

Дина-сантиметр (din-cm, дин-см); 1 дин-см = 1 • 10-'Н-м
Килограмм-сила-метр (kgf-m, кгс-м); 1 кгс-м=9,80665 Н-м (точно)
Килопонд-метр (кр-т; —); 1 килопонд-метр=9,80665 Н-м (точно)
Фунт-сила-фут (lbf-ft,—); 1 фунт-сила-фут= 1,35582 Н-м

Момент импульса (момент количества движения)

Грамм-квадратный сантиметр на секунду (g-cm^/s, г-см2/с); 1 г-см2/с=1-10-' кг-м^/с
Килограмм-сила-метр-секунда (kgf-m-s, кгс-м-с); 1 кгс-м-с=9,80665 кг-м^-с
Тонна-метр в квадрате на секунду (—. ***т-иУс);*** 1 т-м2/с= = 1-10® кг-м%

Напряжение (механическое)

Килограмм-сила на квадратный миллиметр (kgf/mrn^, кгс/мм^); 1 кгс/мм2=9,80665-10« Па (точно)
Килопонд на квадратный миллиметр (kp/mrn^, —); 1 килопонд на кв. мм=9,80665-10® Па (точно)

Работа, энергия

Ватт-час (W-h, Вт-ч); 1 Вт-ч=3600 Дж
Киловатт-час (kW-h, кВт-ч); 1 кВт-ч=3,6-10« Дж
Килограмм-сила-метр (kgf-m, кгс-м); 1 кгс-м= =9,80665 Дж
Килопонд-метр (кр-т,—); 1 килопонд-метр=9,80665 Дж
Литр-атмосфера (—, л-атм); 1 л-атм=101,328 Дж
Лошадиная сила-час (—, л.с.ч.); 1 л.с.ч.=2,64780-10® Дж
Фунт-сила-фут (lbf-ft, —); 1 фунт-сила-фут=1,35582 Дж
Эрг (erg, эрг); 1 9рг=Ы0-' Дж

Мощность

Калория в секунду (cal/s, кал/с); 1 кал/с=4,1868 Вт
Килограмм-сила-метр в секунду (kgf-m/s, кгс-м/с); 1 кгс-м/с=9.80665 Вт
Лошадиная сила (—, л.с.); 1 л. с.=735,499 Вт
Лошадиная сила (Великобрит.) (hp, —); 1 лошадиная сила (Великобрит.) =745,700 Вт
Эрг в секунду (erg/s, эрг/с); 1 эрг/с=1-10-' Вт

Динамическая вязкость

Килограмм-сила-секуида на квадратный метр (kgf-s/m^ кгс-с/м2); 1 КГС-С/М2=9,8С665 Па-с
Паундаль-секунда на квадратный фут (pdl-s/ft^, —.); **1** паундаль-секунда на кв. фут=1,48816 Па-**с**
Пуаз (Р, П); 1 П=0.1 Па-с
Фунт-сила-секунда на квадратный метр (lbf-s/m^, —); 1 фунт-сила-секунда на кв. метр=47,8803 Па-с

Кинематическая вязкость

Квадратный метр на час (m^/h, м7ч); 1 иЧч=2,77 (7) X X 10-" иУс
Квадратный фут на секунду (ft^/s, —); 1 кв. фут на секунду=0,0929030 mVc
Квадратный фут на час (ft^/h, —); 1 кв. фут на час= =2,58064-10-5 м2/с
Стоке (St, Ст); 1 Ст=ЫО-'' mVc

Объемный расход

Кубический дюйм в секунду (in^s, —); 1 куб. дюйм в секунду= 1,6387-10-= м'/с
Кубический сантиметр в секунду (cm^/s, ***смЧс;*** 1 ***смЧс***= = 1-10-® м=/с
Кубический фут в секунду (ft^/s, —), 1 кубический фут в секунду=0,0283168 м^с
Литр в минуту (1/min, л/мин); 1 л/мин=1,66(6) -10-^ м®/с
Литр в час (l/h, л/ч); 1 л/ч=2,77(7) -10-^ м=/с

Количество теплоты (теплота)

Британская тепловая единица (Btu, —); 1 британскаи тепловая единица = 1,05506-10® Дж
[ори
(точно)
Калория пятнадцатиградусная (calis, кал15); 1 кал15= = 4,1855 Дж
Калория термохимическая (calth, калтх); 1 кал1.^= =4,1840 Дж
Термия (th. —); 1 термия=4,1868-10= Дж

Удельная теплоемкость

Калцрия на грамм-градус Цельсия [ca]/(g-°C), кал/(г-Х)]; 1 кал/(г.'>С) =4,1868-10= Дж/(кг-К)
Килокалория на килограмм-градус Цельсия [kcal/(kg-°C), ккал/(кг.°С)1; 1 ккал/(кг-°С) =4,1868-10= Дж/(кг-К)

Молярная теплоемкость

Калория на моль-градус Цельсия [cal/mol-°C), кал/(моль.-'С)]; 1 кал/моль-"С) =4,1868 Дж/(моль-К)

Теплопроводность (коэффициент теплопроводности)

Британская тепловая единица в секунду-фут-градус Фаренгейта [Btu/(s-ft.deg F, —]; 1 британская тепловая единица в секунду-фут-градус Фаренгейта= = 6,23064-10= Вт/(м-К)
Калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия Гcal/(s-cm°C), кал/(с-см-°С)]; 1 кал/(с-см-°С) = =418.7Вт/(м-К)
Килокалория в час на метр-градус Цельсия fkcal/(h-m-^C), ккал/(ч-м-''С)]; 1 ккал/(ч.м-''С) = = 1,163 Вт/(м-К)
Эрг в секунду на сантиметр-Кельвин [erg/(s-m-K), эрг/(с-см-К)1; 1 эрг/(с.см-К) = 1-10-=^ Вт/(м-К)

Электрический заряд

Фарадей (F, Ф); 1 Ф=96484,**1** |КЛ
Фраиклин (Fr, Фр); 1 Фр=3 3564-10-'° Кл

Напряженность электрического поля

Вольт на сантиметр (V/cm, В/см); 1 В/см=100 В/м

Электрический момент

Дебай (D, D); 1 D=3,33564-10-®° Кл-м

Плотность тока

Ампер на квадратный миллиметр (A/mm®, А/мм^); 1 А/мм2=1.10б А/м2

Удельное электрическое сопротивление

Ом-квадратный миллиметр на метр (fi-mm^/m, ОмХ Хмм7м); 1 Ом-мм'/м=МО-« Ом-м
Ом-сантиметр (Q-cm, Ом-см); 1 0м-см=0,01 Ом-м

Удельная электрическая проводимость

Ом в минус первой степени-сантиметр в минус первой степени (Q-'-cm"', Ом-'-см-'); 1 ОМ-1-СМ-I= = 100 См/м
Метр на ом-квадратный миллиметр [m/ffi-mm^), м/(Ом-мм=)]; 1 м/(0м-мм2) = 1.10е См/м

Магнитная индукция

Гаусс (Gs, Гс); 1 Гс^МО"" Тл
Вебер на квадратный сантиметр (Wb/cm^, Вб/см^); 1 Вб/см2=1-10''Тл

Магнитный поток

Максвелл (Мх, Мкс); 1 Мкс=1-10-з Вб

Напряженность магнитного поля

Эрстед (Oe, Э); 1 3=79,5775 А/м
Ампер на сантиметр (А/сш, А/см); 1 А/см=100 А/м
Ампер-виток на сантиметр (—, Ав/см); 1 Ав/см=100 А/м

Магнитодвижущая сила

Гильберт (Gb, Гб); 1 Гб=0,795775 А
Ампер-виток (—, Ав): 1 Ав=1 А

Магнитный момент

Магнетон Бора (цв це), 1 цв=9,274078-А-м^

Яркость

Апостильб (asb, асб); 1 асб=0,318310 кд/м^
Ламберт (Lb, Лб); 1 Лб=0,318310-10^ кд/м=
Стильб (sb, сб); 1 сб=1-10^кд/м2

Поглощенная доза

Рад (rad, рад); 1 рад=0,01 Гр

Эквивалентная доза

Бэр (rem, бэр); 1 бэр=0,01 Дж/кг

Активность нуклида в радиоактивном источнике

Кюри (Ci, Ки); 1 Ки=3.700-10»° Бк (точно)

Экспозиционная доза рентгеновского и у-излучений

Рентген (R, P); 1 P=2,58-10-' Кл/кг (точно)

1.14. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

На внутренней стороне обложки справочника приведены значения фундаментальных физических постоянных и некоторые соотношения между различными единицами, которые рекомендованы рабочей группой международного Комитета по константам для науки и технологии (COD ATA)* в 1986 г. f15].

Новый список самосогласованных фундаментальных постоянных отличается от рекомендован!'ых Государственной службой стандартных справочных данных Государственного комитета стандартов при СМ СССР [18] тем, что в него включены два типа констант: стохастические, как обычно, и точные. К точным константам отнесена, например, скорость света в вакууме С= 299 792 458 м/с, значение которой следует из гювого определения метра [20]. В список включены уточненное значение гравитационной постоянной G=6,672 59(85) X X10-"Н-м2-кг-2 [19], оцененные значения масс [16, 17] и некоторые другие постоянные.

При составлении таблиц использовались также ГОСТ 8.417—81 Единицы физических величин. Документ 1ЛР-20-1978: Обозначения, единицы измерения и терминология в физике [21] и другие пособия [14. 15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной **системе** единиц. М.: Изд-во стандартов, 19R0.

2. **ГОСТ** 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78) ГСИ: Единицы физических величии.

3. **ГОСТ** 15484—81. Излучения ионизирующие и их измерения: Термины и определения.

4. РД 50—160—79. Методические указания: Внедрение и применение СТ СЭВ 1052—78: Метрология. Единицы физических величин.

5. РД 50—454—84. Методические указания: Внедрение и применение ГОСТ 8.417—81: ГСИ. Единицы физических величин в области ионизирующих излучений.

6. **Иванов В. И., Машкович В. П., Центер** Э. М. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике. М.: Энергоиздат, 1981.

7. Сена **Л. А.** Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1977.

8. Чертов **А. Г.** Единицы физических величии. М.: Высшая школа, 1977.

9. **Широков К.** П., **Богуславский М. Г.** Международная система единиц. М.: Изд-во стандартов, 1984.

10. **Фундаментальные** физические константы: ГСССД 1—76/Издание официальное. М.: Изд-во стандартов, 1976.

11. Luther G. G., TowSer W. R.//Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 48. Ko 3. P. 121—123.

12. PetSey B. W.//Nature. 1983. VoL 303. № 5916. P. 373—376.

13. Документ UIP—20—1978: Обозначения, единицы измерения и терминология в физике/'Успехи физ. наук. 1979. Т. 129. Вып. 2. С. 289—338.

14. Физический энциклопедический словарь/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1984.
15. Cohen E. R., Taylor **B.** N. The 1986 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants У Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1987. vol. 92. № 2. P. 85—95.
16. Reviews of particle properties//Rev. Mod. Phys 1984. Vol. 56. № 2. Pt. II. P. S2—S304.
17. Wapstra **A.** H., Audi **G.** The 1983 Atomic Mass Evaluation. 1985. A432. № 1. P. 1—362.
18. Фундаментальные физические константы. ГСССД 1—76/Издание официальное. М.: Изд-во стандартов, 1976.
19. Luther G. C., Towler W. R. Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 48, No 3. P. 121—123.
20. Petley B. W. Nature, 1983. Vol. 303. No 5916. P. 373—376.
21. Документ LIP-20-1978: Обозначения, единицы измерения и терминология в физике. УФН. 1979. Т. 129. Вып. 2. С. 289—338.

ГЛАВА 2

СИММЕТРИЙНОЕ И ТЕНЗОРНОЕ ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ

Ю. в. Писаревский

2.1. СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ [1, 2]

Термодинамически равновесное состояние твердого тела — кристаллическое. Кристаллы — тела, обладающие упорядоченной трехмерно-периодической пространственной атомной структурой. Множество природных и синтетических твердых веществ (металлы, сплавы, минералы и др.) состоят из очень мелких произвольно ориентированных кристалликов. Если мелкие кристаллы ориентированы хаотически, их называют ***поликристаллами.*** При преимущественной сриентацин кристалликов твердое тело образует ***текстуру.*** В последнее время резко возросли масштабы получения и применения отдельных крупных кристаллов, которые часто называют ***монокристаллми.***

Свойства кристаллов определяются особенностями строящих кристаллическую решетку атомов и молекул, силами связей и взаимным расположением в пространстве — ***структурой кристаллов.***

Очень часто кристаллическая решетка имеет различные элементы симметрии, соответствующие определенным операциям в трехмерном пространстве. Выполнение этих операций в кристалле оставляет решетку неизменной Между симметрией кристаллической решетки и симметрией тех или иных свойств существует четкая взаимосвязь. Важно учитывать, что относительно различных свойств и в зависимости от уровня рассмотрения — микроскопического или макроскопического, в статике или динамике симметрия объекта может изменяться и по-разному описываться. При этом в каждом слу1;ае будет определенная иерархия групп симметрии (отличающихся совокупностью элементов симметрии).

Идеальные кристаллы характеризуются свойствами однородности и анизотропии. Однородность определяет неизменность свойств при перемещении точки измеля на расстояние, кратное периодам решетки.

Пзотропия — зависимость свойств от направлений. Она зависит от группы симметрии. Принимая среду однородной, пренебрегают влиянием дефектов решетки: блоков, дислокаций и т. п. В сравнительно сложных соединениях от точки к точке в той или иной степени изменяется стехиометрия (т.е. локальный химический состав кристалла) Например, в кристалле ниобата литня соотношение между оксидами лития и ниобия может изменяться иногда даже от 0,9 до 1,1. От дефектов и состава зависят также свойства кристаллов, но так как эта зависимость сравнительно слабая, приведенные свойства приписываются однородному кристаллу с идеализированным составом.

Основным свойством пространственной кристаллической решетки является трехмерная периодичность, когда можно выделить три некомпланарных вектора **а,** в, **с,** любая линейная комбинация которых переводит точку решетки в эквивалентную ей, т.е. вектор ***Ш=Аа+Вв+Сс,*** где ***А, В,*** С — любые целые числа, переводит точку решетки в эквивалентную. Эту операцию называют ***трансляцией.*** Параллелепипед, построенный на векторах **а. Ь,** с, называют ***параллелепипедом повторяемости*** или ***элементарной ячейкой.*** Помимо трансляций в **большом** числе кристаллических решеток имеются и некоторые элементы симметрии.

Поворотные оси. Поворот на **угол** ***а=2nlN,*** который переводит любой элемент кристаллической решетки в эквивалентное состояние, определяет наличие оси симметрии. Эти оси обозначают ***N,*** значение которой определяет порядок оси. В кристаллах возможны поворотные оси 1, 2, 3, 4, 6**-го** порядков. Операция **I** соответствует повороту на 2я.

Плоскость зеркального **отражения** (плоскость **симметрии).** Соответствующую операцию обозначают буквой т (от слова mirror — зеркало) или символом 2, так как эта операция представляет собой и инверсионный поворот второго порядка.

Инверсионно-поворотные оси. Обозначаются цифрой,_отвечающей порядку поворота, с чертой сверху: 1, 2, 3, 4, 6. Важнейший частный случай — **ось** 1— центр симметрии.

Зеркально-поворотные оси. Совпадают **с** инверсионно-поворотными осями, но с элементарным углом поворота, отличающимся от них на п. Зеркально-поворотные оси обозначают цифрой, отвечающей порядку поворота, со знаком тильды ('~) наверху: 1 2, 3, 4 6. Инверсионные и зеркально-поворотные оси связаны так:

ЛГ„ = или 1 = 2 = т; 3 = 6; 4 = 4; 6 = 3:

Г = 2.

Винтовые оси. Эти оси имеют угловую и трансляционную компоненты:

2ж

, ЛГ = 2, 3, 4, 6;

Операция означает, что вместе с поворотом вокруг данной оси осуществляется трансляция вдоль этой же оси. Общий символ винтовых осей — Ng.

Плоскости скользящего отражения. Операция подразумевает отражение относительно данной плоскости с одновременной трансляцией вдоль одного из направлений, лежащих в плоскости. Так как двукратное повторение данной операции сводится просто к удвоенному переносу вдоль направления скольжения, то удвоенная трансляционная компонента совпадает с одним из периодов решетки.

Такие операции обозначают ***a, b*** или ***c*** соответственно наименованию той оси элементарной ячейки, вдоль которой происходит скольжение. Так, для операции ***a*** трансляционная компонента ai равна ***a/2,*** где ***a*** — период решетки (один из характерных размеров элементарной ячейки). В общем случае возможны операции скользящего отражения и вдоль диагоналей граней или вдоль пространственной диагонали элементарной ячейки

$$t' = (b + c)/2; \quad t' = (c \pm a)/4; \quad t' = (a - b \pm c)/4.$$

Полярность. Одной из важнейших характеристик направлений может быть равнозначность их противоположных сторон. Если прямая преобразуется в себя какой-либо операцией, меняющей местами противоположные направления этой прямой, то она неполярна. К элементам, соответствующим таким операциям, относится центр симметрии, ось четного порядка или плоскость симметрии (последние две операции — в случае перпендикулярности указанных элементов данной прямой).

Если указанных операций нет, то направление полярно. В кристаллах только для полярных направлений может наблюдаться полярность свойств.

Сингонии. Кристаллические решетки классифицируются па наличию в них различных элементов симметрии. Прежде всего их можно разделить на семь типов по форме параллелепипедов повторяемости (элементарной ячейки). Эти типы называют сингониями: триклинной, моноклинной, ромбической, тригональной, тетрагональной, гексагональной и кубической.

Решетки Браве. Элементарные ячейки различаются не только сингонией, но и возможным расположением узлов в центре граней или объема параллелепипеда повторяемости. Таким образом получается 14 решеток Браве. В некоторых из них нет дополнительных узлов — такие решетки называют ***примитивными — P.*** Другие относятся к гранецентрированным ***A, B*** или ***C*** (Л, ***B, C*** — грани параллелепипеда повторяемости). Центрировку по всем граням одновременно обозначают символом ***F.*** а центрировку по объему — /.

Таблица 2.1. Решетки Брав

Сингония и параметры ячейки	Тип ячейки (центрированное ть)	Обозначения по Шенфлису	Обозначения международные
Триклинная, ***афЬфс;***	Примитивная ***P***		***P***
Моноклинная, ***афЬфс;*** « = Т = 90-	Примитивная ***P***		***P 21m***
	Гранецентрированная ***B*** (С)	Г^	***B*** (С) ***2/m***
Ромбическая, ***афЬфс;*** ° = Р = Т = 90°	Примитивная ***P***	Г'о	***Pmmm***
	Гранецентркрованная ***C (A, B)***	Г'о	***C (B,A)mmm***
	Центрированная по всем граням ***F***	***A***	***Fmtmm***
	Объемноцентрированная /	***ч***	***Immm***
Тригональная, ***а = Ьфс-,***	Примитивная ***P (R)***	Г.й	***Rim***
Тетрагональная, ***а=Ьфс;*** « = Р = Т==90°	Примитивная ***P***	Г,	***P i/mmm***
	Объемноцентрированная ***I***	I -	***1 A/mmm***
Гексагональная, 7 = 120° ***а^Ьфс;*** а = р = 90°	Примитивная ***P***	fft	***P 6/mmm***
Кубическая, ***а = Ь = с;*** « = Р = Т = 90	Примитивная ***P***	Гс	***Pm 3om***
	Центрированная по всем граням ***F***		***Pm3m***
	Объемноцентрированная ***I***	I t	***1m Ъm***

Точечные группы. Кристаллографические классы

При изучении макроскопических физических свойств представляет интерес не относительное положение элементов структуры, а только их ориентация Поэтому для описания макроскопических свойств, когда кристалл можно представить в виде сплошной среды, нужно знать все комбинации элементов симметрии, отличающиеся набором и взаимной ориентацией этих элементов.

При этом не принимаются во внимание относительное положение элементов структуры, а также трансляции, связанные с плоскостями скольжения и винтовыми осями, т.е. учитываются только следующие элементы симметрии: а) центр симметрии ***1;*** б) зеркальная плоскость ***m*** в) поворотные оси первого, второго, третьего, четвертого и шестого порядков; г) инверсионные оси первого, второго, третьего, четвертого и шестого порядков.

Возможны 32 различные комбинации вышеуказанных элементов симметрии — 32 точечные группы. Они соответствуют 32 кристаллографическим классам. Эти классы объединяются в семь кристаллографичеких групп по сингониям:

1. Триклинная сингония— имеются только оси первого порядка (поворотные или инверсионные).

2. Моноклинная сингония — имеется только одна ось второго порядка (поворотная или инверсионная) или только одна зеркальная плоскость.

3. Ромбическая сингония — имеются три взаимно перпендикулярные оси второго порядка (поворотные или инверсионные), зеркальные плоскости, но нет осей более высокого порядка.

4. Тригональная сингония — имеется одна ос> третьего порядка (поворотная или инверсионная).

Таблица 2.2. Обозначения и названия 32 точечных групп (классов) симметрии

Сингония	Обозначение			Формула симметрии	Название класса
	международное	по Шубникову	по Шенфлису		
Триклинная	1		C,	*V*	Моноэдрический
	T	2		*c*	Пинакондальный
Моноклинная	2	2		*L^*	Диэдрический осевой
	m	*m*		*P*	Диэдричегкий безосный
	2/m	*2:m*		*UPC*	Призматический
Ромбическая	222	2:2		3L^	Ромбо-тетраэдрический
	*mm^*	2-т	**V**I'SV	*ШР*	Ромбо-пирамидальный
		m-2-m		*ШЪРС*	Ромбо-дипирамидальный
Тригокальная	3	3		3	Тригонально-пирамидальный
	32	3:2			Тригонально-трапецоэдрический
	Зт	*3-m*	*E'*	*ШР*	Дитригонально-пирамидальный
	3	6	Сзг = Se	L i6C	Ромбоэдрический
	3т	*6m*	*Du*	*фmpc*	Дитригонально-скаленоэдрический
		4	Q	*L**	Тетрагонально-пирамидальный
	422	4:2	*Di*	*L4L^*	Тетрагонально-трапецоэдрический
	A/m	4:т	*Cih*	*L*PC*	Тетрагонально-дипирамидальный
Тетрагональная	*1mm*	4.т	*Cw*	*L4P*	Дитетрагонально-пирамидальный
	Almnrni	m.4:m	*Dih*	*LHVbPC*	Дитетрагонально-дипирамидальный
	4	4	S4	*L*	Тетрагонал ьно-тетраэдрический
	42m	4 - *m*	/Эа^т = V'd	*L\2mp*	Тетрагонально-скаленоэдрический
Гексагональная	6	3 : т	*Сш*	*L^P*	Тригонально-дипирамидальный
	Ы2	m . 3:m	*Ош*	*miHP*	Дитригонально-дипирамидальный
	6	6	*Св*	*v*	Гексагонально-пирамидальный
	622	6:2	*De*		Гексагонально-трапецоэдрический
	6/m	6:m		*L^PC*	Гексагонально-дипирамидальный
	бmm	6 . m	*C,V*	*mp*	Дигексагонально-пирамидальный
	6/mm	m . 6 : m	*D,h*	*mi^ipc*	Дигексагонально-дипирамидальный
Кубическая	23	3/2	*T*	*3L4L^*	Тритетраэдрический
	т3	6 / ^	*Тп*	*ЗЬЧфРС*	Дидодекаэдрический
	43т	3/4	*Та*	*зфmp*	Гексатетраэдрический
	432		*о*		Триоктаэдрический
	тЗт	6/4	*Он*	*3L4Ll6L^9PC*	Гксоктаэдрический

е. В международной и шубниковской системах обозначрний приведены ты симметрии, из которых можно вывести остальные. В графе «Формула симметрии» приведены все элементы симметрии данного класса: L — оси, С — дентр. Я — плоскость симметрий; перед каждым символом стоит число соответствующих элементов.

5. Тетрагональная сингония — имеется одна ось четвертого порядка (поворотная или инверсионная).

6. Гексагональная сингония — имеется одна ось шестого порядка (поворотная или инверсионная).

7. Кубическая сингония — имеются четыре оси третьего порядка, расположенные параллельно объемным диагоналям куба

Пространственные группы симметрии

Пространственные группы — это бесконечные группы, образуемые комбинацией решеток Браве с операциями симметрии точечных групп, а также с плоскостями отражения и винтовыми осями. Всего для 32 классов точечной симметрии существуют 230 пространственных групп симметрии. В качество примера в табл. 2.3 приведены пространственные группы, соответствующие точечной группе Csv. Обозначение пространственных групп по Шенфлису является просто обозначением точечной группы с установленным порядковым номером пространственной группы внутри класса.

В международные обозначения входят символ решетки Браве и операции (элементы) симметрии в определенном трехпозиционном порядке в соответствии с символом точечной группы и выбором кристаллографических осей ***X, Y, Z*** (о выборе осей см. ниже).

2. 3. Пространствеиные группы для класса Cg

Решетка Браве	Простые группы	Группы с плоскостями скользящего отражения	Группы с винтовыми осями
P (примитивная)	C'^ - ***Pmm*** 2	C | „ - P c c 2 (2) ; ***(4„-Pma2(2)***	C L - ***Pmc2i(2); cl^ — Pca2i*** (4)
		C1,-Pnc2(4); ***Cl-Pba2(4)***	***CL-*** P m r t 2 i (4) ; C | „ — P я а 2]L (S)
		C^o __ p n n 2 (8)	
C (гранецентрированная)	***Cll - Ccc*** 2 (2)	***C11-Ccc2(2)***	***cZ-*** ***Cmc*** 2i (2)
A **(гранецентрированная)**	C l l A m m 2	***ell - Abm 2*** (4); C'^ - ***Ama 2*** (2)	
		eg-Aba 2 (4)	
F (гранецеитрированная по трем граням)	C^® — ***Fmm*** 2	C > 9 - F d r f 2 (8)	
I (объемноцентрированиая)	***d®*** — ***Imm*** 2	***Cl,-Iba 2*** (8); ***cf^-Ima 2*** (8)	-

иую группу.

Магнитная симметрия [4)

Для магнитных материалов находящиеся лентных кристаллографических позициях атомы могут иметь различно ориентированный в пространстве магнитный момент. На рис. 2.1 схематически показаны различные виды неколлинеариых магнитных структур.

Для учета ориентации магнитного момента в магнитной симметрии к описанным выше элементам симметрии добавляют «-преобразование, изменяющее направление магнитного момента атома или группы атомов на противоположное.

В отношении симметрии данная ситуация описывается шубниковскими группами антисимметрии (черно-белой симметрии, см. табл. 2.4).

В группу ОГ входят кристаллы, у которых среднее по времени значение плотности магнитного момента равно нулю (диамагнетики и парамагнетики). Остальные 90 классов имеют магнитную структуру. Среди них 32 класса (группа О) не содержат операции /?—это полярные (одноцветные) классы. В качестве примера тип структур для этих классов показан на рис. 2.1,а и *б.* Оставшиеся 58 классов (группа ***G'***) содержат операцию R в сочетании с другими операциями симметрии.

Таблица 2.4. **Соотношение между группами антисимметрии и магнитной симметрии**

G — полярные (одноцветные)	*0'* — смешанной полярности (двухцветные)	С/'-нейтральные (серые)	Всего классов
13 + 19 = 32 (230)	18-Ь 40 =58 (1191)	32 (230)	122(1651)

Примечание. Снизу подчеркнуто количество классов, допускающих спонтанную намагниченность Ig. В скобках приведено число соответствующих пространственных групп.

В табл. 2.5 Приведены магнитные классы симметрии. Видно, что 31 класс допускает спонтанную намагниченность. Кристаллы, относящиеся к этим классам, являются ферро- или ферримагнетиками. К остальным 59 классам принадлежат антиферромагнитные кристаллы.

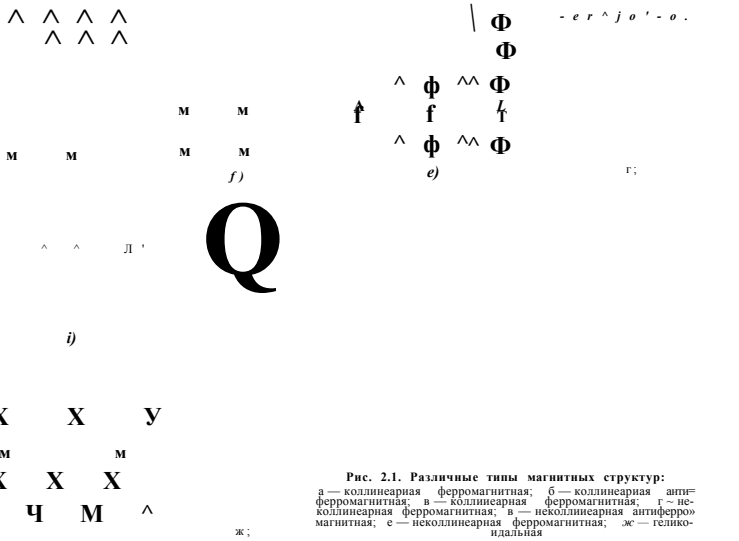


Рис. 2.1. Различные типы магнитных структур:
а — коллинеариая ферромагнитная; б — коллинеариая анти= ферромагнитная; в — коллинеарная ферромагнитная; г — не- коллинеарная ферромагнитная; в — неколлинеарная антиферро» магнитная; е — неколлинеарная ферромагнитная; *ж* — гелико- идальная

Таблица 2.5. Магнитные классы симметрии

Сингоиия	Группа G'	Группа G
Триклинная	1'	1
Моноклинная	2', т, 27т', 2/т', 27т	2, m, 2/m
Тетрагональная	4', 4', 47т, 4/т', 4'22, 42'2, *Гmm',* 4'2от', 4"2'т, 42'т', *4'/m'mm, A/mm'm',* 4/m'm'm', *Mm'mm. A'/m'mm.'*	4, J, 4/m 422, 4mm, T2то 4/тл1т
Тригональная	*3',* 32', 3m', 3m', 3'm', *3'm*	3, 3, 32, 3m, 3m
Гексагональная	6'. 6', 67m', 6/m', 6'/m, 6'22', 62'2', *6'mm',* 6m'm', 6'm'2, ^'2', 6'm'2', 6'/m'mm', *б/mm'm', 6/mmm, G/m'mm, 6'/mmm'*	6, 6, 6/m, 622, 6mm, 6m2, 6/mmm
Кубическая	*m'3,* 4'32, 4'3m', m3m', m'3m', m'3m	23, m3, 432, 4 3m, m3m

ь, подчеркнуты. штрихом. Классы, допускающие спонтанную на-

предельные группы

Есть класс веществ, где наблюдается частичная упорядоченность. К нему относятся, в частности, текстуры.

В качестве примера таких веществ можно назвать древесину, пьезоэлектрические керамики и др Симметрийные свойства таких сред описывают с помощью предельных (непрерывных) точечных групп симметрии, которые содержат операции бесконечно малых поворотов, т.е. оси симметрии бесконечного порядка (оо). Таких групп семь: оо, оотт, оо22, оо/т, *оо/ттт,* оо/оо, ***оо/оотт.***

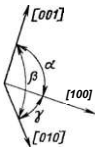
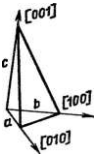
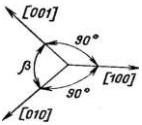
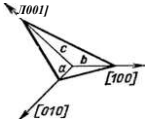
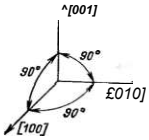
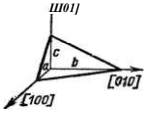
Кристаллографическая система координат

Каждая решетка однозначно определяется своей элементарной ячейкой. Но в одной и той же решетке возможен выбор элементарной ячейки бесконечным числом способов.

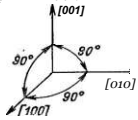
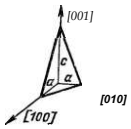
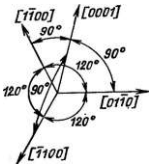
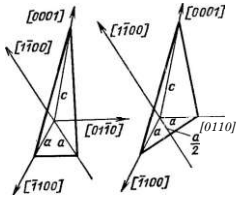
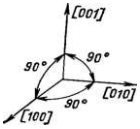
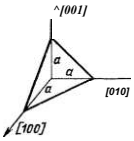
Однако во всех классах, исключая относящиеся к триклинной и моноклинной сингониям, мелеет быть выбрана единственная ячейка, однозначно описывающая одинаковые решетки, — это параллелепипед Браве.

Естественно, кристаллографическую систему координат связывают с тройкой координатных некомпланарных векторов at, a?, аз, направленных вдоль ребер параллелепипеда Браве, а началом координат является одна из вершии этого параллелепипеда. При этом

Таблица 2.6. Кристаллографическая система координат

Кристаллограс1*1ческие i		
Оси [100], [010] параллельны действительным или возможным ребрам кристалла. Ось [001], параллельная оси наиболее развитого пояса, ставится вертикально; аф		Единичная грань отсекает на кристаллографических осях неравные отрезки *а ф* ***ФЬфс:*** 
Ось [010] совмещается с осью 2 или с нормалью к m и располагается горизонтально. Оси [100] и [001] выбираются в плоскости, перпендикулярной [010], параллельно действительным или возможным осям кристалла, ось [001] — вертикально; 90° =≠ β		Единичная грань отсекает на кристаллографических осях неравные отрезки; аф ***ФЬфс:*** 
Оси [100], [010], [001] совмещаются с тремя осями 2 или с одной осью 2 и нормалями к двум плоскостям; а == р = f =90°:		Единичная грань отсекает на кристаллографических осях неравные отрезки; аф ***ФЬфс:*** 

Продолжение табл. 3.42

	Кристаллографические оси	Единичная грань
Тетрагональная	За ось [001] принимается ось 4 или 4 . Оси [100] и [010] выбираются в плоскости, перпендикулярной [001], или по осям 2, или по перпендикулярам к плоскостям т, или по направлениям, параллельным действительным или возможным ребрам кристалла; а = р = Y = 90°: 	Единичная грань отсекает на двух горизонтальных осях равные отрезки ГЁ не равный им отрезок по вертикальной оси [001]; 
	Всего четыре оси. За ось [0001] принимается ось высшего (третьего или шестого) порядка. Оси [1100], [1100] и [ОНО] выбираются в плоскости, перпендикулярной оси (0001], или по оси 2, или по иормали к плоскостям ***т,*** или по направлениям, параллельным действительным или возможным ребрам кристалла	Единичная грань отсекает на двух горизонтальных осях равные отрезки и неравный отрезок по [0001]. Если грань отсекает равные отрезки на соседних осях, ее символ может быть ***(А)*** [1О11], или [Т1Ol], или [0111], если через одну (Б), то ее символ может быть [1121], илп [1211] , или [2111]
Тригональная и гексагональная		
Кубическая	Оси совмещаются с тремя осями 4, 4 или 2 (в^случае ^отсутствия четвертых осей); 	Единичная грань отсекает на кристаллографических осях равные отрезки: о = 

вектор hkl = fta^ + -f

называют кристаллографической осью и обозначают ***[К к,*** q. Например, пространственная диагональ параллелепипеда Браве представляет направление [111].

Соответствующую кристаллографическому направлению плоскость обозначают теми же индексами, но в круглых скобках ***(h к*** табл. 2.6 приведена установка кристаллографических осей для различных сингоний.

Таблица **2.7. Правила выбора кристаллографической системы координат**

сингония	Ориентация относительно кристаллографических осей	Ориентация относительно элементов симметрии
Триклиниая	Z II [001], или К 11 [010], или Х Ii [100]	–
Моноклинная	К Ii [010] и ***X*** Ii [100] (или Z II [001]). Иногда Z II [010] и XII [100] (или ***Y*** II [001])	Ось ***Y*** параллельна оси ***2*** или нормали к плоскости ***m.*** Иногда ось 2 параллельна оси ***Z***
Ромбическая	г щ о о п, к II [010], Х Ii [1001	Ось [001] параллельна оси 2. Оси ***X к У*** параллельны другим осям 2 или нормалям к ***m***
Тригональная, гексагональная	Z|i [0001], ***Y*** IKЮТО], иногда ***X*** Ii [ЮГО], а ***Y***\\ [1120]	Ось 2 параллельна оси высшего порядка (3, или 3, или 6, или б). Ось ***X*** параллельна оси 2 (если они имеются, кроме класса 6m2). Для классов 3т и ***&m2*** обычно ***X*** перпендикулярна ***m,*** ио иногда ***m*** нормальна к оси ***Y***
Тетрагональная	Z II [001], К II [010], Х Ii [100]	Ось Z параллельна оси высшего порядка (4 или 4). ***X*** и У параллельны осям 2 или нормальны к плоскостям ***m*** (если они есть). Для класса Т2то обычно оси X и F параллельны осям 2
Кубическая	2 II [001], F 11 [010], Х Ii [100]	Оси X, К, Z параллельны трем осям 4 (или 4), а если их нет — трем взаимно нормальным осям 2

Кристаллофизическая система координат

Так как кристаллографическая система координат в общем случае не ортогональна, для описания физических свойств используют ортогональную кристаллофизическую систему координат (табл. **2.7).**

Как и кристаллографическую систему координат, кристаллофизическую систему выбирают правой так, чтобы в положительный квадрант кристаллофизической системы координат входил квадрант кристаллографической системы с углами, меньшими 90°.

В ряде случаев выбор кристаллофизических осей неоднозначен. В сочетании с неоднозначностью выбора кристаллографических осей для тех же классов произвол оказывается еще большим. Это необходимо учитывать при использовании констант кристаллов, описывающих анизотропные физические свойства. Чаще всего в таких случаях установку осей связывают с данными по дифракции рентгеновского излучения от различных кристаллографических плоскостей.

Симметрия физических свойств

Математически физические величины описываются тензорами различных рангов.

Физические тензоры в зависимости от их отношения к объекту бывают двух видов: так называемые ***полевые*** тензоры, описывающие воздействие на кристалл, и ***материальные*** тензоры, описывающие свойства кристалла, т. е. соотношение между воздействием и реакцией на это воздействие.

РАНГ ТЕНЗОРА. Тензор нулевого ранга — ***скаляр*** — величина, не зависящая от преобразования координат.

Есть величины, сохраняющие числовые значения при преобразовании координат, ио при отражении в плоскости, инверсии, зеркальном и инверсионном повороте меняющие знак. Такие величины называют ***псевдоскалярами*** (или псевдотензорами нулевого ранга). Примером псевдоскаляра может служить вращение плоскости поляризации света.

Тензор первого ранга — ***вектор.*** Связь между векторами ***а к с*** можно выразить через компоненты этих векторов (а,, 02, ***as*** и с,, cj, cз) вдоль осей ***X, Y*** и ***Z:***

$$\begin{aligned} Ci &= (JuOi\ \text{-1- t}^{\wedge}\text{ia}^{\wedge}z\ \text{-i-} \\ Ca &= L'aifii + L'a^{\wedge}aa + L'ggag; \\ Cз &= b'siOi + Us^{\wedge}a^{\wedge} + Ussas. \end{aligned} \qquad (2.1)$$

Величину, связывающую векторы а и **с,** записывают в виде таблицы

$$Viu = \begin{matrix} L'li\ U: \\ L',1\ u, \\ Uзг\ u, \end{matrix} \qquad (2.2)$$

и называют ***тензором второго ранга.*** Коэффициенты Un, называют ***компонентами тензора.*** Сокращенно **(2.1)** записывается в виде

$$Ci = Viuau, \quad i, \quad 2, \quad 3. \qquad (2.3)$$

Такая запись предполагает суммирование по повторяющимся индексам.

Связь между вектором и тензором второго ранга описывается тензором третьего ранга

$$Ci^{\wedge}WijkUjk, \qquad (2.4)$$

Таблица 2.8. Соотношении между различными физическими свойствами, описываемыми тензорами различных рангов

Определяющее уравнение	Воздействие	Реакция	Материальный тензор, описывающий свойство кристалла
= ДГ	Скаляр	Скаляр	Скаляр
	Температура *T*	Энтропия S	Теплоемкость С
ДР; = *pihT*	Скаляр	Вектор	Вектор
	Температура *T*	Поляризация *P*	Пироэлектричество *p*
AS = Qi&Ei	Вектор	Скаляр	Вектор
	Напряженност{) электрического поля *E*	Энтропия S	Электрокалорический эффект *Q*
Di = 4jEj	Вектор	Вектор	Тензор второго ранга
	Напряженность электрического поля *E*	Электрическая индукция *D*	Диэлектрическая проницаемость Blj
∂T	Вектор	Вектор	Тензор второго ранга
	Градиент температуры vr	Плотность теплового потока/г	Теплопроводность k^ -
*Bi = (X.^ . я^*	Аксиальный вектор	Аксиальный вектор	Тензор второго ранга
	Напряженность магнитного поля *H*	Магнитная индукция *B*	Магнитная проницаемость /
. . = а. . ДГ	Скаляр	Тензор второго ранга	Теизор второго ранга
	Температура *T*	Деформация *X.^ •*	Тепповое расширение *a.* .
	Тензор второго ранга	Скаляр	Тензор второго ранга
	Деформация _ у	Энтропия S	Пьезокалорический эффект J
	Вектор	Тензор второго ранга	Тензор третьего ранга
	Напряженность электрического поля jBft	Деформация *j*	Пьезоэлектрический эффект *i.k*
	Напряженность электрического поля jBft	Нелинейная диэлектрическая проницаемость на оптических частотах *AB-^* у	Электрооптический эффект ''г, *i.k*
^i. f i, k, I 'i . *I*	Тензор второго ранга	Тензор второго ранга	Тензор четвертого ранга
	Механическое напряжение ,	Деформация *X^^ ^*	Упругая податливость *!. к. 1*
! = Л, *I*	Деформация *X^^* ,	Механическое напряжение *e.* .	Упругая жесткость *с- у* ,
/ = '"i, /. Л, / *I*	Механическое напряжение ,	Нелинейная диэлектрическая непроницаемость иа оптических частотах *ABtj*	Пьезооптический эффект *i. к. 1*
^^t, j i .k l^k. I	Деформация *X^^* ,	Нелинейная диэлектрическая непроницаемость на оптических частотах *AB^* -	Упругооптический эффект *Pi. j. k. t*

а связь между двумя тензорами второго ранга — тензором четвертого ранга

$$= \text{с ц ы Х Ы -} \qquad (2.5)$$

Соотношения типа (2.3) — (2.5) (которые можно было бы продолжить до тензоров сколь угодно высоких рангов) и выражают связь между воздействием на кристалл, реакцией на это воздействие и свойством кристалла. В табл. 2.8 приведены различные материальные и полевые физические свойства, описываемые тензорами различных рангов. В этой же таблице приведены соотношения, связывающие воздействие, реакцию и свойство кристалла.

В табл. 2.8 отражена небольшаи часть различных свойств кристаллов. Можно еще упомянуть термоэлектричество, коэффициенты самодиффузии, пиромагнитный и пьезомагиитный эффекты, магнитострикцию, фотогальванический эффект, удельное электрическое сопротивление, электрогирацию и другие эффекты, описываемые тензорами до четвертого ранга включительно. В последнее время исследуются, а иногда и используются эффекты, описываемые тензорами пятого и шестого рангов: нелинейная упругость, акустическая активность, пьезооптический эффект второго порядка, электроупругий эффект и ряд других.

Матричное описание физических свойств кристаллов

Тензоры различных рангов удобно представлять и использовать в виде матриц. Например, (2.2) Представляет матрицу тензора второго ранга. Соотношения между тензорами (например, уравнения (2.3) — (2.5)) также удобно использовать в виде матриц. Операции с матрицами можно найти в специальной литературе [5, 7]. Наиболее важна для настоящего описания операция умножения:

$$\{AB)in = AijBjT,. \qquad (2.6)$$

Если матрица ***А*** представляет собой матрицу (tX/), где (— число строк, ***j*** — число столбцов, а в есть (/X^)-матрица, то произведение ***АВ*** является (iX^)-матрицей. Элементы этой матрицы задаются соотношением (2.6). Следует помнить, что, как правило,

$$\textit{АВфВА.} \qquad (2.7)$$

Весьма часто тензоры второго ранга симметричны

$$Aij = Aji. \qquad (2.8)$$

Тензоры третьего ранга бывают симметричными по двум индексам

$$Uijk\text{-}^Ujik, \qquad (2.9)$$

а тензоры четвертого ранга — по двум парам индексов

$$Uim = U)iM = Uijin. \qquad (2.10)$$

Это позволяет использовать более краткие матричные обозначения с уменьшенным числом индексов. При этом имеется следующая связь между индексами:

$$\begin{matrix} 11 & 22 & 33 & 23 = 32 & 31 = 13 & 12 = 21 \\ \text{ф} & \text{ф} & \text{ф} & \text{S} & \text{ф} & \text{ф} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \qquad (2.11)$$

(верхние индексы — тензорные, нижние — индексы сокращенной матрицы).

Таким образом, для тензора второго ранга

$$\begin{vmatrix} 11 & 12 & 13 \\ 21 & 22 & 23 \\ 31 & 32 & 33 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 6 & 5 \\ 6 & 2 & 4 \\ 5 & 4 & 3 \end{vmatrix} \quad \text{I 1 2 3 4 5 6 i .}$$

Таблица 2. 9. **Матрицы материальных тензоров второго ранга для разных сингоний**

Сингония	Матрица	примечание
Триклинная Моноклинная	Их ***As*** Л ***А,*** ***Ai А^*** Лз 0 ***А,*** 0I	Ось Y парал- лельна оси 2
Ромбическая Тетрагональная Тригональная Гексагональная Кубическая	1 4 ***А^ Аз 0 0*** 0| Их Лз. Лз 0 0 0| [Л Л Л 0 0 0!	

Таблица 2.10. Матрицы материальных тензоров третьего ранга для различных кристаллографических классов

Триклинная система

Класс 1

^13 ^14 ^16 ***Тщ***

•<31 '32 ^33 7^34 Гя5

Класс **Т**

Все компоненты равны О

Моноклинная сингония

Класс 2 (Ось ***У*** параллельна оси второго порядка)

О О О Г14 О Г,
Г21 7^22 Тj3 О О
6' о" 0"'''Гз4 О 7 35

Класс ***т*** (ось ***У*** перпендикулярна плоскости симметрии)

ТЦ Г12 7-13 О Т^, О
О **О** О 7-24 О
Гз1 Гзз О Гз5 о'

Класс 2/т — все компоненты равны 0.

Ромбическая сингония

Класс 222

О о О Г14 О О
О о О О Гзв О
0 0 0 0 О Гз

Класс ***2m***

О О О О Г15
О О О Г24 О
Пг Гэ2 7^33 О О

Класс ***mmm*** — все компоненты равны О

Тетрагональная сингония

О О О 7^14 Г,5 О
О О О Г15 7^14 О
7-31^317^33 О О О

О О О О
О О О 7-15 Г,4 О

Класс ***А m m***

О О, О о Tis о
о о о 7-15 о о
7-31 7-3, Гзз О О О

О О О Г14 0 0
0 0 0 0 —7-14 О
0 0 0 0 0 0

Класс ***42m*** (ось ***X*** параллельна оси второго порядка)

О О О Г,4 О О
0 0 0 0 Гм О
0 0 0 0 О Гз«

Для классов 4/т и ***mmm*** — все компоненты равны О

Продолжение табл. 2.10

Тригональная сингония

Класс 3

TZ ГЗПЗЧ О О О

Класс 3 ***т*** (ось ***X*** перпендикулярна плоскости симметрии)

О О О О Г15
О О О
Гз1 Гзз О О О

Для классов 3, 3/п — все компоненты равны О

Гексагональная сингония

Класс 6

О Г14 Г, 5 О
О —Гм О
О О
'31 Tsi Ts3 О

Класс 6т

О О О О Г^Б О
О О О Г^Б О О
Тз1 Tsi Т33 О 0 0

Класс 622

О О Г^14 О О
0 0 0 0 - Г14 О
0 0 0 0 О о

Ти-ТП О О О
-Г22 Г, , О О 0 2Ги
О О 0 0 0 0

Класс 6m2 (ось X перпендикулярна плоскости симметрии)

0 0 0 0 0 -2^22
-7^2 О 0 0 О
0 0 0 0 0 О

Для классов *6/т* и ***6/mmm*** все компоненты О

Кубическая сингония

Классы 23 и 43т

О О О Г,4
0 0 0 0
0 0 0 0

Для классов 432, т3т, ***т3*** — все модули равны О

Пределъ группы *(текстуры)*

Симметрия оо

О О О Ги Ги О
О О О Tis Г14 О
Тз1 Гз2 Тзз О О О

Симметрия оо 22

О О О Г14 0 0
0 0 0 0 —Г14 О
0 0 0 0 0 0

Симметрия оомm

О О О О Tib О
О О О Ги О О
Tsi Тз^ Т33 О О О

Для групп симметрии ***оо/т. ооitmm,*** оо/оо, оо/оо ***тт,*** все компоненты равны О

Таблица 2.11. Матрицы материальных тензоров четвертого ранга с попарно симметричными индексами (фотоупругость, электрострикция и т. п.) для различных кристаллографических классов

Триклинная сингония

Классы 1.1

, Ри PiB P13 Pl4 P15 Pie
P2] P22 P23 P24 P25 P26
P3i P32 Рзз P34 P35 P36
I P41 P42 P43 PM P45 ***Pie***
: P5i P52 P53 P54 P5B Pse
[Pet ***Pes Рва Pel Рць Pee***

Моноклинная сингония

Классы 2, т, 2/т. Ось 2 или нормаль к ***т*** параллельны оси ***Y***

Рп Pl2 P13 О **P14** О
P2I P22 P23 О P24
P3i P32 Рзз о P34
О О О P44 О
Ры РЪ2 Рьз О *Рьь*
О О О Р54 О

Продолжение табл. 2.11

Ромбическая сингония

Классы 222, 2т, *mmm*

Рп	***Pi 2***	P13 О О О
P21	P22	P23 О О О
		Раз О О О
		О P44 О О
		о о P55 о
		О о о Pee

Тригональная сингония

Классы 3, 3

Рп Pl2 P13 Pl4 P15 P16
P12 Pii Pi3—P14—PIS—PiG
P3i P32 P33 о 0 0
P41—P41 о P44 P4S Psi
P5I—Psi о —P45 P44 P41
-P16 Pl« о — Р l 4 * 1 О о о о Pi4 *

Классы 3/n, 32, 3 m

Pu Pi 2 Pl3 Pi4 о 0
P12 Pii P13-P14 о 0
P3l Рзl Рзз О О О
P41—P41 о P44, О О
о о о о P44P41
*

Тетрагональная сингония

Классы 4, 4, 4/т

Pi2 P13 О О Ри
Pu P13 О о —Pie
P3i Рзз О о о
О О P44 О о
О О О P44 О
Рб1 о 0 0 Pee

Классы 4 mm, 42m, 422, 4/mmm

Pu P12 Pl3 О О
P12 Pll Pl3 О О
P3. P3. P33 О О
О о
О О О **"У"**
О О О

Гексагональная сингония

Классы 6, 6, 6/т

Рц Pi2 Pi3 О О Pie
P12 P11 Лз О О —Pie
P3i Рзх Рзз О О О
О О О P44 P54 О
О О О —P54 P44 о
-Pi6 P16 о о о *

Классы 6m2, 6mm, *2, &lmmm*

Pu P12 **P.3** о 0 0
Plo Pu Pi3 0 0 0
P3. р. Рзз 0 0 0
0 pi4 0 0
0 0 0 0 p44 0
0 0 0 0 0 ^

Кубическая

Классы 23, т3

Рп Pi2 **Pi3** О О О
Pi3 P11 Pi2 О О О
Pi2 P13 P11 О О О
О О О P44 О О
О О О О P44 О
О О О О **P44**

Классы 43m, 432, m3m

Pu P12 **P12** 0 0 0
P12 Pu **P12** 0 0 0
P12 P12 Pu 0 0 0
0 0 0 P44 0 0
0 0 0 0 P44 0
0 0 0 0 0 P44

Примечание. Знаком * обозначено -— (р^—р,.).

Для тензора третьего ранга Uijk, симметричного по индексам ***ij,*** получается матрица (3X6) вместо матрицы (3X9):

111	112	113	121	122	123	131	132	133 j
211	212	213	221	222	223	231	232	233 | ^
311	312	313	321	322	323	331	332	333 |

11	12	13	14	15	16	
21	22	23	24	25	26	
31	32	33	34	35	36	

Для тензора четвертого ранга, симметричного попарно по индексам *ij* и *kl,* вместо матрицы (19x9) получается матрица (6X6).

При переходе к более компактной матрице следует помнить, что для компонент, содержащих индексы 4, 5, 6 в сокращенном обозначении, надо вводить численные множители (2, 4 и т. п.) относительно соответствующих правилу (2.11) компонент тензорной матрицы.

На матрицы материальных тензоров накладываются дополнительные ограничения, связанные с симметрией кристаллов (табл. 2.9—2.11).

Классы симметрии, для которых все компоненты тензора третьего ранга равны нулю, обладают общим элементом симметрии — центром симметрии. Это не случайно, а является следствием ***принципа Неймана.*** Суть этого принципа в том, что группа симметрии любого физического свойства какого-либо кристалла включает элементы симметрии класса, к которому принадлежит данный кристалл. Это условие необходимое, но недостаточное. Например, для существования пьезоэлектричества отсутствие центра симметрии обязательно. Но в кристалле без центра симметрии пьезоэффекта может и ие быть.

В приведенных в табл. 2.9—2.11 матрицах для многих кристаллографических классов несколько компонент должны быть равны друг другу. Обычно их обозначают одинаково по компоненте с наименьшими индексами. При использовании таблиц следует помнить о всех не равных нулю компонентах, так как в таблицах приводятся только независимые компоненты.

Например, для класса 32 (случай кристалла кварца) есть только две неизависимые компоненты матрицы, описывающей пьезоэффект. Однако, как следует из матрицы (см. табл. 2.10), компонента du может описывать, во-первых, деформацию растяжения — сжатия по оси ***X*** при приложении электрического поля по той же оси, во-вторых, деформацию растяжения — сжатия по оси У при приложении электрического поля по оси ***X*** и, в-третьих, деформацию сдвига ХУ при приложении поля по оси У.

Некоторые материальные тензоры четвертого ранга (например, тензор упругой жесткости сцы) симметричны ие только относительно перестановки первого со вторым и третьего с четвертым индексов, но и относительно перестановки первой пары индексов со второй:

$$\text{Сцы} = \text{Cjiki} = \text{cijitt} — \text{сш}] - \qquad (2.12)$$

, При этом вид матриц (6X6), приведенных в табл. 2.11, сохраняется, но число независимых компонент уменьшается за счет уменьшения в 2 раза числа независимых недиагональных компонент (так как ci/=c,-;). Например, для класса 3 неизависимые компоненты тензора фотоупругости — **Pi2,** Pl3, **Pl4,** Pl5, **Pl6,** P31, Pзз, ***PiU Pn,*** PiS, а неизависимые компоненты тензора упругой жесткости для того же класса — $c_{„}$, c,2, c,з, c,4, Cis, c,в, C44, C46.

Влияние внешнего воздействия

В кристаллофизике помимо принципа Неймана есть еще один симметрийный постулат, позволяющий определить симметрию кристалла при внешнем воздействии. Этот постулат называют ***принципом Кюри.*** Согласно этому принципу кристалл при внешнем воздействии изменяет свою точечную симметрию, но сохраняет элементы симметрии, общие с симметрией воздействия.

Для определения реакции на воздействие можно использовать перемножение матриц согласно (2.6) Например, так записывают упругопьезодиэлектрическую матрицу:

$$\begin{array}{|c|cccccc|cccc|}
 & \mathbf{I} & \mathbf{X^{\wedge}} & \mathbf{X_3} & \mathbf{Xi} & \mathbf{X^{\wedge}} & \mathbf{X^{\wedge}} & \mathbf{\backslash Di} & \mathbf{D,} & \text{O3!} & \\
\mathbf{Si} & \text{tn} & \text{ti2} & \text{c IS} & \text{c,4} & \text{c, 5} & \text{Cie} & \boldsymbol{Sii} & \text{gl2} & \boldsymbol{gl3} & \\
\mathbf{S,} & \text{C21} & \text{c}^{\wedge}\text{2} & & \text{C24} & \text{Cjs} & \text{c}^{\wedge}\text{e} & \text{gai} & \text{g22} & \text{ff23} & \\
\mathbf{S3} & \text{C3I} & \text{C32} & \text{Cgg} & \text{C34} & \text{Cзв} & \text{C36} & \boldsymbol{831} & \boldsymbol{ё3\ 2} & \boldsymbol{g33} & \\
\mathbf{S4} & \text{C41} & \text{C42} & \text{C43} & \text{C44} & \text{C45} & \text{c„6} & \boldsymbol{gil} & \text{g42} & \text{Й43} & \\
\mathbf{S5} & \text{CS1} & \text{CъˆCъЪ} & & \text{C64} & \text{C5б} & \text{Csg} & \boldsymbol{gbt} & \text{g52} & \text{g53} & (2.13) \\
\mathbf{Sfi} & \boldsymbol{Cб1} & & \boldsymbol{Cвз\ Ce4\ Cф\ Cee} & & & & \boldsymbol{Ru} & \text{^62} & \text{без} & \\
\boldsymbol{El} & & & \boldsymbol{di3\ du\ dm} & & & \mathbf{die} & \boldsymbol{Ч1} & \text{Si,} & \text{'13} & \\
\boldsymbol{E2} & \mathbf{^21} & \mathbf{^22} & \text{4 з} & & & \mathbf{^26} & & \text{^22} & \text{^23} & \\
\boldsymbol{Eз} & \mathbf{rfsi} & \mathbf{^32} & \boldsymbol{ds3\ dsi\ dgi\ dse} & & & & \boldsymbol{Ч1} & \text{^32} & \text{^33} &
\end{array}$$

Первый столбец матриц в данной записи описывает воздействие, а первая строка — реакцию. В частности, деформация в кристалле инобата лития (класс 3), вызванная электрическим полем с компонентами по осям X и Z, записывается так:

$$\begin{array}{|c|ccccc|}
 & \text{Xз} & \text{A'4} & \text{Xв} & & \\
\boldsymbol{El} & \boldsymbol{dii} & \boldsymbol{-dn} & 0 & 0 & \text{rfis} \quad 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \text{di5} & 0 \quad \text{2du} \\
\boldsymbol{Eз} & \boldsymbol{ds,} & \text{dsi} & \boldsymbol{d33} & 0 & 0 \quad 0
\end{array} \qquad (2.14)$$

В соответствии с (2.6) из (2.14) получаем: X'i = Ei^u +

+ **£3^31;** = ***Esdss-*** = - ***EAi*** + ***E^si'*** ***Xь*** =

X4 = Xe = 0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнштейн Б. К. Современная кристаллография. Т. 1. М.: Наука, 1979.

2. Шубников А. В., Флинт Е. Е., Бокий Г. Б. Основы кристаллографии. М.: Изд-во АН СССР, 1940.

3. Шувалов Л. А.//Современная кристаллография. Т. 4. М.. Наука, 1981.

4. Залесский А. В.//Современная кристаллография. Т. 4. М.: Наука, 1981.

5. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967.

6. Вустер У. Применение тензоров и теории групп для описания физических свойств кристаллов. М.: Мир, 1977.

7. Кочин Н. Е. Векторное исчисление и начало тензорного исчисления. М.: Наука, 1965.

8. Желудев И. С. Симметрия и ее приложения. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.

ГЛАВА 3

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Н. в. Кадобнова, А. М. Братковский

3.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В зависимости от вида нагружения (растяжение, сжатие, изгиб, кручение, срез) и условий воздействия (температура, скорость, периодичность и время приложения) материалы принято характеризовать различными мерами сопротивления их деформации и разрушению — характеристиками механических свойств

Механические свойства условно могут быть разделены на три основные группы.

Первая группа содержит комплекс характеристик, определяемых при однократном кратковременном нагружении. К ним относятся упругие свойства: модуль нормальной упругости ***E,*** модуль сдвига ***G*** и коэффициент Пуассона ц Сопротивление малым упругопластическим деформациям определяется пределами упругости (Тупр, пропорциональности Опц и текучести ао,2- Предел прочности Ов, сопротивление срезу Тср и сдвигу Тсдв, твердость вдавливанием (по Бринеллю) НВ и царапанием (по шкале Мооса), а также разрывная длина Lp являются характеристиками материалов в области больших деформаций вплоть до разрушения. Пластичность характеризуется относительным удлинением б и относительным сужением ij) после разрыва, способность к деформации ряда неметаллических материалов — удлинением при разрыве бр. Кроме того, при ударном изгибе определяется ударная вязкость образца с надрезом KCU.

Вторая группа включает параметры, оценивающие сопротивление материалов переменным и длительным статическим нагрузкам. При повторном нагружении в области многоцикловой усталости определяется предел выносливости на базе iC-hS- IC циклов. Малоцикловая усталость отделяется от многоцикловой условно выбранной базой испытания циклов) и отличается пониженной частотой нагружения (f=0,14-5 Гц). Сопротивление малоцикловой усталости оценивается по долговечности при заданном уровне повторных напряжений или пределом малоцикловой усталости на выбранной базе испытаний. Сопротивление длительным статическим нагрузкам определяют, как правило, при температуре выше же. Критериями сопротивления материалов длительному действию постоянных напряжений и температуры являются пределы ползучести ***Go.2/t*** И длительной прочности 0и . Предел длительной прочности определяют при заданной базе испытаний, обычно 100 и 1000 ч, предел ползучести — по заданному допуску на остаточную (обычно 0,2%) или общую деформацию при установленной базе испытаний.

Третью группу составляют характеристики разрушения. В инженерной практике эти характеристики используются сравнительно недавно. Характеристики разрушения определяются на образцах с заранее выращенными начальными трещинами и оцениваются следующими основными параметрами: вязкость разрушения, критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации К:с, вязкость разрушения, условный критический коэффициент интенсивности напряжений при плосконапряженном состоянии ***Кс,*** удельная работа образца с трещиной КСТ и скорость роста трещины усталости СРТУ при заданном размахе интенсивности напряжений Л/С-

Среди механических свойств только упругие свойства металлических материалов являются структурно нечувствительными характеристиками, связанными с параметрами кристаллической решетки и практически не зависящими от режимов термомеханической обработки, если последние не вызывают аллотропических превращений. Для практически изотропных поликристаллических металлических материалов упругие константы связаны соотношением ***E=2*** 0(1-bfi). Упругие свойства определяют при статических испытаниях (£ст. ***Ост)*** или динамическим методом (£дин, Один) по резонансной частоте колебаний тонкого стержня равномерного сечения под действием малых напряжений. Значения упругих констант, определенных обоими методами, при температуре 20°С и близких к ней практически одинаковы. С повышением температуры при статических испытаниях сказывается влияние деформации ползучести, вследствие чего статический метод дает прогрессирующее понижение значений упругих констант относительно данных, полученных динамическим методом.

Все другие механические свойства в большей или меньшей степени структурно чувствительны и анизотропны. Резкая анизотропия упругих и других механических характеристик присуща многим неметаллическим матери алам, что определяется их ориентированным строением. Некоторая анизотропия свойственна и большинству металлических материалов. Уровень прочности, пластичности, выносливости и характеристик разрушения обычно в продольном направлении относительно оси деформации полуфабриката выше, чем в поперечном. Однако для некоторых, например титановых, сплавов характерна «обратная» анизотропия. Наблюдается значительная разница в пределах текучести при растяжении и сжатии у большинства магниевых деформируемых сплавов (<To,2сж<(To,2).

Между некоторыми характеристиками механических свойств экспериментально установлены зависимости, позволяющие с достаточной степенью точности оценивать предел прочности материала по значениям твердости, а сопротивление срезу — по пределу прочности. Существуют также корреляционные связи между пределом выносливости и пределом прочности, а также между различными характеристиками разрушения.

3.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 20°С

Механические свойства металлов и сплавов при растяжении определяются по ГОСТ 1497—84, при сжатии — по ГОСТ 25. 503—80, при кручении — по ГОСТ 3565—80, при срезе — по ОСТ1. 90148—74. ГОСТ 9012—59 регламентирует методику определения твердости по Бринеллю, ГОСТ 9013—59 — твердости по Роквеллу, ГОСТ 9450—76 — микротвердости, ГОСТ 9454—78 — ударной вязкости.

Определение механических свойств пластмасс при растяжении проводится по ГОСТ 11262—80 и ГОСТ 25.603—82, при сжатии — по ГОСТ 4651—82. Упругие свойства оцениваются по ГОСТ 9550—81, твердость — по ГОСТ 4647—80. Прочность при разрыве и модуль эластичности резин определяются согласно ГОСТ 270—75 и ГОСТ 210—75 соответственно.

В табл. 3.1—3.32 представлены следующие характеристики:

E — модуль упругости — коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением и относительным удлинением;

О — модуль сдвига (модуль касательной упруго-

С1и) — коэффициент пропорциональности между касательным напряжением и относительным сдвигом;

[Х — коэффициент Пуассона — абсолютное зиачение отношения поперечной деформации к продольной в упругой области;

0пц — предел пропорциональности — напряжение, при иагружеиии до которого деформации возрастают пропорционально напряжениям; в технике принят условный Оцц — напряжение, при котором отклонение приращения деформации от линейного закона достигает определенного значения, обычно 50%;

Ох2 — предел текучести (условный)—напряжение, при котором остаточная деформация после снятия нагрузки составляет 0,2 %;

Ов — временное сопротивление (предел прочности), прочность на разрыв (для неметаллических материалов) — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом при испытании;

б — относительное удлинение — отношение абсолютного остаточного удлинения образца после разрыва к начальной расчетной длине;

ф — относительное сужение — отношение уменьшения площади поперечного сечении образца после разрыва к начальной площади;

бр — относительное удлинение при разрыве (для неметаллических материалов) — полное изменение расчетной длины образца в момент разрыва, отнесенное к начальной расчетной длине;

Lp — разрывная длина — характеристика прочности нитей, волокон, тканей и других материалов, для которых невозможно точно определить площадь поперечного сечения; вычисляется по формулам $Lp^P.,—;\ Li,= — <$ $\frac{Q}{gb}$ где ***Pp*** — нагрузка при разрыве; ***Q, I к b*** — масса, длина и ширина образца между зажимами; ***g*** — масса 1 м^ материала;

КСи — ударная вязкость — работа разрушения образца с кольцевым надрезом при ударном изгибе, отнесенная к площади образца в сечении надреза, для неметаллов определяется также иа образцах без надреза;

НВ — твердость по Брииеллю, определяемая вдавливанием стального шарика в испытуемый материал как среднее напряжение, приходящееся на единицу поверхности сферического отпечатка;

— микротвердость — сопротивление вдавливанию алмазного наконечника при очень малых нагрузках с получением малых глубин и размеров отпечатка

Твердость по шкале Мооса — сопротивление механическому воздействию минералов и других материалов, определяемое царапанием. Мерой твердости служит номер наиболее твердого минерала, не оставляющего следа при царапании. Эталонами твердости являются тальк [1], гипс [2], кальций [3], флюорит [4], апатит [5], ортоклаз [61, кварц [7], топаз [8], корунд [9], алмаз [Ю].

Металлы

Таблица 3.1. Упругие свойства металлов

				Литература
Алюминий	69—72	25-26,5 j	0,31	1, 5]
Бернлий	300	145	0,03	
Бор	345			
Ванадий	139—170	47—60	0,36	
Висмут	**32**	12	0,33	
Вольфрам	350—400	125-155	0,3	1, 4, 6]
Гадолиний		23	**0,26**	2, 3]
Гафний	79-150		0,29	**1, 2, 6]**
Германий	**82**			**1]**
Гольмий	67			**[2]**
	64-98		0,24	2, 3]
	195-205	77-80	**0,28**	1, 3, 4, **7]**
Золото	78-83	28,5	0,4	3, **8]**
Индий	10,5		0,46	
Иридий	520—590	**ЖО**	**0,28**	
Иттербий		^		
Иттрий			**0^7**	**Из,**
Кадмий	50—53	**20**	0,3	1. 4, 7]
Кальций	**26**			
Кобальт	206	78,5	0,32	
Кремний	110-160			**1, 2]**
Лантан	38	15	**0,26**	2, 3]
Литий	5		0,42	[2, 4]
Магний	42,5—45	**16—18**	0,35	|1, 3, 4, 7]
Марганец	**200**			
Медь	110-130	41,5-44	**0^8**	iiL3, я
Молибден	300-330	120	0,31	
Неодим	38	15		Ii; II
Никель	**200—220**	73-77	0,3—0,4	1, 2, 4]
Ниобий	91—160		0,39	1, 6]
Олово	41—55	16—19	0,33	1, 2, 4]
Осмий	575	225	**0,28**	3, 8]
Палладий	115—125	49-52		[1-4, 8]
Платина	150-175	61—68,5	**0!3б**	1—3, 8]
Празеодим		14	0,3	**Г '**
Рений	475			
Родий	385	150	**0,26**	**3 в,**
Рубидий	2,5			
Рутений	420—500	ITS	0,31	
Самарий	34—55	13	0,35	**iJ!**
Свииец	14—18	5,5-8	0,45	**1**,2, 4, 14]
Селен	55	19	0,45	1, 4]
Серебро	72—83,5	27—29,5	0,37	**:i, 3,4,8j**
Сурьма	57—78			
Таллий	8			**|i! Zl**
Тантал	190	70	0,35	**„ 3.6,**
Те	44			
	57,5			2]
Титан	ПО	41,5	**0^3**	
Торий	74—80			
Уран	210			3, 10]
Хром	280—315	**110**	0,31	
Цезий	1,75			
Церий	44		0,25	1-3]
Цинк	100—130		Э,3—0,35	1, 2, 7]
Цирконий	84—97		0,35	1, 2, 6]
Эрбий	73—115		0,24	[2, 3]

Таблица 3.2. **Прочность и пластичность металлов**

Металл	Состояние, степень чистоты	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа	Литература
Алюминий	Отожженьое, 99,95% Al	22	50	45	90	150	[1, 3-5]
	^ , 99,5% Al	30	80	35	80	250	1, 3-5 1
Барий			12		40	—	4, И]
Бериллий	Литое	—	140	0	—	—	1, 3,
	Отожженное	230	320	2,5	—	•—	3. 4
	Горячепрессованиое	300	450	3,5	—	1500	3 4]
Бор	Отожженное	—		—	—	—	1i
Ванадий	» , 99,98 % V	105		30	75	800	[3, 4, 6]
	, 99,6 % V	540	590	10	25	—	[3, 4, 6]
Висмут		—	5-20	0	0	90	п .4]
Вольфрам	Деформированное, 99,95 % W	760	1000	0	0	4150	, 3
	Рекристаллизованиое, 99,95% W	—	500	0	0	3200	[1, 3]
Гадолиний	Кованое	270	395	7	—	700	i3]
Галлий	Отожжьнос	—	40	40		60	1]
Гафний	И	500	700	6	25	1600	1, 6]
Германий	»	—		—	—	—	4, 1.11
Гольмий	Литое	220		5	—	500	3]
Диспрозий	>	230	250	6	—	550	3]
	Кованое	330	435	3	—	1030	3
Железо	Отожженное, особой чистоты	170	290	50	90	800	[3]
Золото	Отожженное	40	150	40	90	220	, 8]
Иридий		90- 100	400—500	6-10	10-15	1700-2200	8]
Иттербий		67	75	6	—	—	2 1
Иттрий	»	280	300	4	8	900-1650	2, 3]1
Кадмий	И	10	75	20	50	200	1, 4]1
Кальций	»	13,5	60	10	58	300	1-4]
Кобальт	Литое, 9Э,4 % Co	—	240	—	—	1250	1, 3, 4
	Закаленное, 99,4 % Co	210	280	4	8	1500	1, 3, 4
	Отожженное, 99,4 % Co	300	470	3,5	4,5	1550	1, 3, 4
Кремний			700	0	0		1, 4^
Лантан	Литое	125	130	8		400	3]
	Кованое	190	220	4			3]
Литий	Отожженное		115	50		—	1, 4]
Магний	Литое	24	115	8	9	300	1, 3, 4]
	Отожженное	40	185	15	20	—	1, 3, 4]
	Деформированное	90	195	10	12	400	1, 3. 4]
Медь	Отожженное	70	215	60	75	400	3]
	Нагартованцое	380	440	6	35	1000	3]
Молибден	Отожженное	570	670	25	50	1800	, 3]
Неодим	Литое	165	170	11			3]
	Кованое		215	2	—	400	3]
Никель	Отожженное	80	400	40	70	860	1, 31
Ниобии	» , высокой чистоты	210	275	28	80	500	1, 3
	» , технической чистоты	280	330	20	80	700	, 3
	Литое	500	600	10	20		fl, 3. 4]
Олово	Отожженное		30	40	75	60	F41
Осмий	Отожженное					3000—4000	U, 61
Палладий	И	60	195	40	85	480	{3, 8]
Платина	»	70	145	45	95	470	13, 81
Празеодим	Литое	100	ПО	10			[3]
	Кованое	200	215	7		400	[3h
Рений	Отожженное		500	20		2000	111
Родий	»	70—100	400—570	8—15	20—25	1000—1300	[3, 8'1
Рутений	»	360—400	500—600	3—10		2000-3000	гз, 811
Самарий	Литое	115	125	3			[3]
	Кованое	180	190	8		550	31
Свинец	Отожженное	5	14—18	50	100		1, 141
Селен	»					710	41
Серебро	»	20-30	140—180	45	90	500	1, 3, 81
Скандий	»	—	400	10		550	2, 31
Стронций			50	2	10		4, 81
Сурьма		—	8	0	0	—	1, 4,1

Продолжение табл. **3.21**

Металл	Состояние, степень чистоты	^о.г-МПа	Зд, МПа	6, %	Ф, %	НВ. МПа	Литература
Таллий	Отожженное	—	9	35	100	—	1]
Тантал	»	400	500	30	75	1250—1400	1, 3, 6]
	Нагартованное	—	950	4	6	2250	1, 3, 6]
Теллур	Отожженное	—	10	35	100	270	1. 4]
Титан	», особой чистоты	100	250	70	85	600	2, 3, 6, 10]
	», 99,6 %	300	350	30	60	—	2, 3, 6, 10J
Торий		180	220	60	70	—	1]
Уран	»	200	300	12	15	—	И
Хром	»	190	300	2	5	1000	3, 6]
Церий	Литое	90	105	24	—	250	1, 3]
	Кованое	ПО	150	17	—	300	1, 3]
Цинк	Отожженное	100	125	12			1]
Цирконий		80—115	230-280	25	40	570	1,4, 11]
Эрбий	Литое	295	300	4		600	31
	Кованое	290	320	7	—	950	[3]

Стали

Используемые в машиностроении стали делятся на конструкционные (углеродистые и легированные) и высоколегированные нержавеющие.

Марка конструкционной углеродистой стали содержит двузначное число, обозначающее среднее содержание углерода в сотых долях процента (ГОСТ 380—71, ГОСТ 1050—74).

Согласно ГОСТ 4543—71 в обозначении марок конструкционной легированной стали первые две цифры указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буквы за цифрами означают: Р — бор, Ю — алюминий, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Г — марганец, Н — никель, М — молибден, В — вольфрам. Цифры после буквы указывают примерное процентное содержание легирующего элемента в целых единицах; отсутствие цифр означает, что в стали содержится до 1,5% этого легирующего элемента. В конце наименования марки высококачественной стали ставится буква А. У особо высококачественной стали в конце обозначения марки стоит через тире буква Ш.

В марках нержавеющих высоколегированных сталей по ГОСТ 5632—72 химические элементы обозначаются следующими буквами: А — азот, В — вольфрам, Д — медь, М—молибден, Р — бор, Т—титан, Ю — алюминий, Х—хром, Б—ниобий. Г—марганец, Е — селен, Н—никель. С—кремний, Ф—ванадий. К—кобальт, Ц—цирконий. Цифры, ^стоящие в наименовании марки после букв, указывают, так же как и в наименовании марок конструкционных сталей, процентное содержание легирующего элемента в целых единицах. Содержание элемента, присутствующего в стали в малых колнчествах, цифрами не обозначается. Цифра перед буквенным обо.значением указывает на среднее или при отсутствии нижнего предела на максимальное содержание углерода в стали в сотых долях процента. Наименование марки литейной стали заканчивается буквой Л

Механические свойства конструкционных сталей зависят от содержания углерода, для углеродистых сталей содержание углерода является определяющим (рис. 3.1, табл. 3.3).

Между некоторыми характеристиками механических свойств сталей установлены эмпирические зависимости. Твердость по Бриеллю приблизительно пропорциональна временному сопротивлению: для мало- и средиепрочных углеродистых и термически обработанных сталей Ств =0,3-^0,4 НВ. Сопротивление срезу Тср для мало- и среднепрочиых сталей составляет 65—80% их предела прочности, для высокопрочных — 55—65%. Предел текучести при сжатии примерно равен пределу текучести Оо2, определенному при растяжении.



Рис. 3.1. Механические свойства конструкционных углеродистых деформируемых и литейных сталей в зависимости от содержания углерода [3, 24]: сплошные линии — деформируемые стали, пунктирные — литейные; по оси абсцисс — марки сталей в соответствии со средним содержанием углерода

Таблица 3.3. Механические свойства углеродистых и малолегированных сталей малой и средней прочности после нормализации [3,24] jE = 200 210 ГПа; G = 77 81 ГПа; = 0,28 и- 0,31

Стали			%	Ф. %	НВ. мпа	кси. МДж.мг
	Стали углеродистые обыкновенного ка'					
Сто	—	320	22	—	—	—
Ст1, Ст1кп		320—400	33	–	1100	–
Ст2, Ст2кп	190-220	340—420	31	–	**1160**	–
Ст3, Ст3кп	210—240	380—500	25—27	55—65	**1310**	
Ст4, Ст4кп	240-260	420-520	23—23	–	1430	–
Ст5	260—280	500—640	19—21	45—55	1700	–
Ст6	300—310	600—710	14—16	40	1970	
	Стали углеродистые качественные и малолегированные					
08	200	330	33	60	—	-
Ш	210	340	31	55	1160	–
15	230	380	27	55	1300	–
20, 15г, Юг2	250	430	25	55	1430	–
25, 20г	280	460	24	50	–	0,9
30, 25г	300	500	22	50	1970	0,9
35, ЗОг	320	550	20	45	•–	0,8
40, 35г	340	580	19	45	'–	0,7
45, 40г, 30г2	360	610	16	45	2290	0,6
50, 45г, 35г2	380	640	14	40	2410	0,5
55, 50г, 40г2	390	670	12	40	2550	0,4
60, 45Г2	410	700	12	40	2550	–
65, 60г	420	710	11	35	2550	---
70, 65г, 50Г2	440	750	10	30	2690	—
70г	460	800	8	—	—	—
75*1	900	1100	7	30	–	—
80*1	950	1100	6	30	—	
85*>	1000	1150	6	30	–	-

После закалки и отпуска.

3.4. Механические свойства конструкционных деформируемых легированных сталей после закалки и отпуска [3, 9, 24] £ = 200-^210 ГПа; G~ 77-^-81 ГПа; ji = 0,28 ^ 0,31

Стали	МПа		6, %	Ф. %	НВ, МПа	кси. МДж/м8
	Стали малой прочности*'-					
09Г2, 09Г2Д, 12ГС, 14Г2, 19Г, 12ХГ	450—480	300—400	18			
15ГС, 18Г2С, 10Г2СД, 14ХГС	500	350	18	-	-	-
ЮХСНД, 15ХГН, 15ХСНД	520-540	360—400	16—18			
25Г2С, 35ГС	600	400	14			
	Стали средней прочности					
20ХГСА	800	650	12	45	2070	0,7
39ХГН, 33ХС, 20ХН4ФА*2	900	700	12—13	45—50	2290	0,8—1,0
35Х, ЗОХРА, 38ХА, ЗОХМ, 38ХС, 20ХНЗА	950	750-800	11—12	45—55	1970—2290	0,7—1,0
40Х, 40ХР, 45Х, 35ХМ, 20ХГР, 40ХГ, 40ХГР, 40ХН, 18ХНВА	1000—1050	800—850	9-12	45—50	2070-2400	0,6—0,9
50Х, 50ХН, 35ХМФА, ЗОХГНА, 25ХГСА, ЗОХГС, ЗОХГСА, 40ХНМА*2, 40ХНВА*S 25ХНВА*2, ЗОХНЗА	1100	850—950	9—12	40—50	2170-2290	0,5—0,8

Продолокение табл. 3.42

Стали	ajj, МПа		6. %	Ф. %	НВ. МПа	кси, МДж/м=
		Высокопрочные стали				
35ХГСА*», 30ХГСНА*З, 30Х2ГН2СВМА*»	1500—1650	1200—1300	10—13	45—55	4100—4500	0,7—0,9
ЗОХГНСМА	1750	1400	10	45	4600	0,6
40ХГСНЗВА*®	1900	1400	11	50	4900	0,6
40ХГСН3ВА	2000	1500	10	40	5150	0,55
Н18К9М5Т (закалка и старение)	2050	1950	7	50		0,5
		Жаропрочные стали				
ЗОХМА, 20Х3МВФ, 33ХН3МА	900—950	750-850	12—19	50—60	2290	0,9—1,3
ЗОХА, ЗОХГСА, ЗОХ3ВА, 40ХНВА	1050-1100	950	14—16	55-65	2290	0,6—1,4
30Х2Н2ВФА	1150	1100	15	60	2400	0,8
23Х2НВФА	1350	1150	13	55		0,6
ЗОХГСНА	1600	1350	9	45		0,6

После нормализации.
НЕ = 2690 МПа.
Изотермическая закалка.

Таблица 3.Б. Прочность и пластичность конструкционных литейных сталей [3]
£ = 190 ч- 200 ГПа

Стали	cjg, МПа	'0.2-	S. %	Ф. %	НВ, МПа	кси. МДж/м2
	Легированные стали после закалки и отпуска					
27ГЛ, ЗОГСЛ, 40ХЛ	650	400—500	10—14	20—30	1800—2290	0,35—0,5
35ХНЛ, 35ХМЛ, ЗОХГСТЛ	700	500—550	12	25	2070—2600	0,4
35ХГСМЛ, ЗОХНМЛ, ЗОХНВЛ	**800**	600—650	10—12	20—30	2170-2690	0,4
35ХГСМЛ, ЗОДХСНЛ, 27ХГСНЛ	900-1000	700—850	8 - 1 0	20—30		0,25—0,4
27ХГСНЛ, после изотермической закалки	1300-1500	1000—1200	5 - 6	**20**		0,25
	Жаропрочные стали после нормализации и отпуска					
20МЛ, 25МЛ, 20ХМЛ, 20ХМФЛ	450—500	250—315	16—20	30—40		0,3—0,4
ЗОХМЛ, 23Х5МЛ	- 650—700	400—450	16—18	30—40		**0,6**
Х6И2МВФ после закалки и отпуска	990	700	10	20		

Таблица 3.6. Механические свойства нержавеющих сталей [3, 9]

Стали	МПа		S. %	Ф. %	НВ, МПа	кси. МДж/мШ
	Аустенитные стали после закалки					
04Х18Н10, 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 10Х17Н13М3Т	420—520	180—200	40	55	1350—2000	
08Х18Н12Т, 12Х18Н9, 08Х17Н16М3Т, 20Х18Н9. 06Х23Н28М2Т	550-600	200—220	35—40	55	1350—2000	
20Х13Н4Г9, 12Х17Г9АН4, 12Х14Г14Н	650-700	250—300	35—40	45—50	1600—2000	–
Х18Н9Л	450	200	25	35		1

*Продолжение табл. 3.*42

СТЛИ	МПа		« %	*Ф. %*	НВ, МПа	кси. МДж/м«
			Аустенитно-ферритные стали после закалки			
08Х20Н14С2, 20Х20Н14С2 08Х21НБТ, 10Х21Н5Т, 08Х21Н6М2Т	550-600 650-700	250—300 300—450	35-40 20—30	-	-	1 0,6
			Ферритные и полуферритные стали теле отпуска			
12Х17, 08Х17Т, 15Х28, 15Х25Т	450—500	250—300	18—20	40—55	1400—1900	
10Х13Л, 20Х13Л	550—650	400—450	12—16	40—50		0,6—0,8
			Мартенситные стали после закалки и отпуска			
10Х13, 20Х13	1200	1050	10—18	45—60	2550	0.5-0,7
30Х13, 40Х13	1650—1750	1400—1550	3—8			
23Х13НВНФ	1500	1100	10	40		0,4
10Х17Н2, 10Х12Н2ВЛ1Ф. 13Х14НВРА	1100—1300	900—1000	8-12	50—60		0,6—1,2
08Х17Н3СЛ	850—950	650-750	6—8	10—20	_	0,25
10Х13Н3ВФЛ	1200	100	7	20		0,19
			Стали переходного класса после закалки, обработки холодом и старения			
08Х15Н9Ю, 08Х16Н6, 08Х17Н5М3	1200	900				0,5
10Х15Н4АМ3	1450—1600	1200	15-20	50-60	I =	1-1,5
			Мартенситно-стареющие стали после закалки и старения			
08Х15Н5Д2ТБ	1150—1300	1000—1300		60—70		1,4—2
03Х12Н10Д2ТБ	1600	1500		60	1 Г	0,8
			Жаропрочные стали после закалки и старения			
45Х14Н14В2М, после отжига	720	320				0,5
12ХН35ВМТР, 12ХН35ВТ	800—950	450-550				**0,6**
40Х15Н7Г7Ф2МС, 40Х12Н8Г8МФБ, 10Х12Н20Т3Р, 10Х»2Н22Т3Л1Р		600	15			**0,3**
10ХН35ВТЮ	1320	950—1000	20—25			**0,75**

Алюминиевые сплавы

Для обозначения состояний деформируемых сплавов приняты следующие шифры: М—мягкий, отожженный; П — полунагартованный; Н — нагартованный; Т — закаленный и естественный состаренный; Т1 — закаленный и искусственно состаренный на высокую прочность; Т2 — закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему по сравнению с режимом Т1 более высокие значения вязкости разрушения п сопротивления коррозии под иапряжением; Т3 — закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему наиболее высокое сопротивление коррозии под напряжением и высокие значения вязкости разрушения. Буква «ч» в обозначении марки сплава указывает на повышенную чистоту сплава (по примесям). Химический состав сплавов — по ГОСТ 4784—74

Режимы термической обработки литейных сплавов дополнительно к марке сплава обозначаются следующим образом: Т1 — искусственное старение без предварительной закалки; Т2 — высокотемпературное старение. Отливки, не подвергаемые термической обработке, дополнительного шифра при марке сплава не имеют. Химический состав сплавов — по ГОСТ ***2685—75.***

Таблиц .7. **Механические свойства алюминиевых деформируемых сплавов малой и средней прочности [3,5]**

£ = 70--72,Б ГПа; G = 27 ч- Г, (Х = 0,31 Ч-0.33 (для ТОНКИУ плакированных листов £ = 68,5 ^ 70 ГПа)

Система легирования	Сплав, состояние	Полуфабрикат	МПа	МПа	6. %	Vp' МПа	НВ. МПз
Al, техничесчий	АД1М АД1Н	Пруток, ЛИСТ То же	80 150	35 100	35 6	55 70	250 320
Al-Mn	АМцМ АМиП АМцН	Лист	ПО 170 220	60 130 180	23 10 5	80 100 110	300 400 550
Al-Mg	АМгIМ АМг2М АМг2П АМг2Н АМг3М АМг3Н АМг4М АМг4П АМгбМ АМгбМ АМгбМ АМгбМ АМгбН	Лист, пруток То же Лист Лист, пруток Лист Лист, пруток Лист Пруток, штамповка Лист, профиль Поковка Лист	120 190 250 280 230 270 280 320 300 300 340 300 400	50 100 210 230 120 230 140 240 150 160 170 150 300	28 23 8 5 25 8 23 12 20 14 20 14 9	100 125 140 155 175 180 210 250	300 450 680 770 580 750 650
Al-Mg-Si	АД31Т АД31Т1 АД33Т АД33Т1 АД35Т АД35Т1 АВТ1	Профиль, пруток То же » Штамповка	170 250 240 320 270 330 350 310	80 210 140 280 200 300 290 260	20 13 20 12 15 10 12 10	 150 160 190 155 180 210 190	 800 650 950 600 950 950 850
Al-Cu-Mg	Д1Т, Д1чТ Д16чТ, Д16Т Д!6чТ, Д16Т Д16Т1, Д16чТ1 Д19Т, Д19чТ Д19Т, Д19чТ ВАД1Т ВД17Т1 АК4-1Т1	Штамповка Лист, плита Профиль, пруток Лист, плита Лист Профиль, пруток Лист Профиль, пруток Штамповка Лист, плита Профиль, пруток Поковка	410 450 480 470 440 480 440 500 520 420 420 420	280 320 350 400 310 350 280 360 340 360 370 320	25 18 12 8 16 10 18 13 17 7 7 8	270 290 290 290 	-
Al-Zn-Mg	В92Т] 1915Т1 1911Т1	Лист, плита Профиль, пруток Лист, плита Профиль, пруток Лист, плита Профиль, пруток	400 470 360 380 420 520	300 350 280 320 350 420	10 8 11 10 12 15		£
Al—Cu—Mg—Si	АК6Т1 АК8Т1 »	Поковка, штамповка Штамповка Пруток	420 420 480	340 310 380	10 10 10	260 2^0	3

Таблица 3.8. Механические свойства алюминиевых деформируемых высокопрочных сплавов [5]

Система легирования	Сплав, состояние	Полуфабрикат	cTg. МПа		6. %	Ф. %	^^р. МПа	НВ, МПа
Al-Zn—Cu—Mg	В95пчТ1	Лист	570	500	12	27	320	—
		Профиль, панель	600	550	12	20	330	1600
	В95пчТ2	Все полуфабрикаты	540	460	12	30	320	1500
	В95ПЧТ3	То же	500	410	12	34	310	1400
	В93ПЧТ2	Поковка, штамповка	470	440	10	30	310	1250
	В93ПЧТ3	То же	440	360	10	40	290	П50
	В96Ц3Т1		630	600	10	***25***		1750
	В96Ц3Т3		540	470	12			
	В96Ц1Т1	Профиль	720	680	6			
	В96Ц1Т2		660	630	8	14		
Al—Cu—Li	ВАД23Т1	Лист	560	500	5	-		
		Профиль, пруток	590	550	5		340	1500

Таблиua 3.9. Механические свойства алюминиевых заклепочных сплавов (проволока) [5]

Система легирования	Сплав, состояние	Т^р. МПа	cjj^, МПа		6, %	4-. %	НВ. МПа
Al-Mg	АМГ5пМ	190	270	150	23	-	700
Al—Cu-Mg	Д18Т	210	300	170	24	50	700
	В65Т	260	400	250	20	50	900
	Д19пТ	290	460	280	20	40	1200
	Д16ПТ	290	450	290	18	35	1200
Al—Zn—Mg—Cu	В95пТ1	340	580	510	8		1500
	В95пТ3	310	500	360	10	45	

Таблица 3.10. Механические свойства порошковых и высокомодульных алюминиевых сплавов [5]

Система легирования	Сплав	Полуфабрикат	*Е.* ГПа		МПа	6. %
Al-Al2O3	САП-1	Профиль	72	210	300	20
	САП-1	Лист	72	300	340	10
	САП-2	Профиль	75	280	350	7
	САП-2	Лист	***75***	290	370	7
	САП-3	Пруток, полоса	77	300	400	4
Al-Si-Ni	САС-1-50	Пруток	100	210	340	2,5
		Труба	100	190	320	1,5
	САС-1-400	Пруток	100	170	270	2,5
Al—Be—Mg	АБМ1	Лист	135	300	450	16
	АБМ3		200	480	580	**7**

Таблица 3.11. Механические свойства алюминиевых литейных сплавов [3,5]

Обганачения способа литья: З — в землю; К — в кокиль; О — в аболочечные формы; В — по выплавляемым моделям; Д — под давлением

Система легирования	Сплав, состояние	Способ литья	Од, МПа	'0.2-	8, %		НВ. МПа
		Жаропрочные сплавы					
Ал-Cu-Ni—Mg	АЛ1, АЛ1Т7	З	200—220	170—180	1	170	800-900
	АЛ1Т5	З	260	220	0,5	220	1000
	АЛ1Т5	К	300	260	1		1200
Al-Si-Cu—Mg	АЛ3Т5	З, 0	250	170	1,5		750
	АЛ3Т5	**З, К,** Е5, О	210	–	1		700
	АЛ5Т5	З	260	210	1		800
	АЛ5Т7	З, К	240	180	1,5		900
	АЛ32Т5	**З, К**	240—260	170—190	2		600—700
	АЛ32Т6	**З, К**	250—270	180-220	1,5-2		600—700
	АЛ4МТ5	З	340	250	3	240	1000
	АЛ4МТ5	**К**	370	270	4	250	1100
	В124Т6	**К**	420	365	2,5	330	1200
	В124Т6	З	360	350	0,5		1100
Al-Cu-Mn	АЛ19Т4	**З, к,** I О	320	210	10		850
	АЛ19Т5	**З, К,** Е**J,** О	375	280	5		1100
Al-Cu-Mn—Ni	АЛ33Т5	З	280	180	2	—	900
	АЛ33Т6	З	300	–		–	1000
		Герметичные сплавы					
Al—Si (силумины)	АЛ2	З	175	**80**	**6**		550
		Д	215	115	**2**		
	АЛ4Т6	З	260	200	4	145	**700**
	АЛ9Т4, Т5	**З, К**	290-210	110—120	2—4		**600**
	АЛ9-1Т5	**З**	270	150	5		
		К	270	220	4		
	АЛ9-1Т6	К	320	240	7		
	ВАЛ8Т5	К	400	340	4		
	АЛ34Т3	К	325	275	**6**	–	–
		Коррозионно-стойкие сплавы					
А!-Mg	АЛ8Т4	З, В, **К, О**	300	170	**12**	230	600
	АЛ13Т4	З, **В, К, О**	160	**100**	**1—3**		**550**
	АЛ22Т4	З, **О, В, К**	240	**180**	1—3		**900**
	АЛ23Т4	**К**	250	140	10		600
	АЛ23-1	**К**	260	140	**12**	200	750
	АЛ23-1Т4	**К**	230	130	7	**180**	**600**
	АЛ27Т4	**З, В, К**	360	180	16	250	**800**
	АЛ27-1Т4	**З, В, К**	380	190	18	260	850
	АЛ28	**З, В, К**	205	—	4-5		550
	АЛ31Т4	**З, К**	360	160	25	-	

Титановые сплавы

Химический состав сплавов — по **ГОСТ** 19807—74.

1 б л и ц а 3.12. **Механические свойства титановых сплавов |3,101**

£= 110--120 **ГПа; 0 = 42и**-45ГПа; = 0,31 **и**-0,34

Сплав	Система легирования	Cg, МПа		6, %	Ф. %		кси, МДж/м^
		Сплавы малой прочности после отжига					
ВТ1-0	99,28% Ti	350-500	300—420	30	60	—	—
ВТ1-1	99,04% Т1	450-600	380—500	25	50	300	
ПТ7М	Ti—Al—Zr	480-680		20			0,8
ОТ4-0	Ti—0,8Al—Mn	500—650		30			
ОТ4-1	Ti—2Al—l,5Mn	600—750	470	20	35—70	400	0,5**—1,0**
АТ2	Ti—Zr-Mo	600—750		20			—
ВТ1-1Л	99,04% Ti	450—600	_	20	40	_	0,5
		Среднепрочные сплавы после отжига					
ОТ4	Ti—Al—Mn	700—900	600	15	45	—	0,35—1,0
ВТ5, ВТ5-1	Ti—Al	750—950	650-700	15	25—40	600—650	0,4—0,5
	Ti—Al-Sn						
ВТ4	Ti—Al—Mn	850—1000	—	12			
ВТ6С	Ti—Al—V	850—1000	800-900	10		—	
ВТ6	Ti—Al—V	950-1050	900	8	30	640	0,3—0,5
6Т14	Ti—Al—Mo—V	930—1100	850—1000	10	20	—	0,6**—1**,2
ВТ20	Ti—Al—Mo—V	950—1100	850-1000	18			
ВТ5Л	Ti—Al	700—900	620	7-12	18—25		
ВТЛ-**1**	Ti-Al-Si	1000—**1**100	900—1000	5-10	10-20		0,15
ВТ6Л	Ti—Al-V	>850		>5			>0,25
ВТ20Л	Ti—Al—Zr—Mo	>900	850	>5	***20***		>0,3
ВТ21Л	Ti—Al—Zr	>1000	_	>4		_	>0,2
		Высокопрочные сплавы после закалки и старения					
ВТ6	Ti—Al—V	1150	1050	8	***30***		0,25
ВТ14	Ti-Al-Mo-V	1150—1400	1080—1300	7	20		0,25
ВТ22	Ti—Al—Mo—V—Fe—Cr	1250—1400	1180—1300	5-8	35-^0		0,3
		1080*	1000	18	40		
ВТ23	Ti—Al—Mo-V-Fe—Cr	1300—1500	1200—1400	5			0,6
ВТ15	Ti—Al-Mo—Cr \	1300—1500	1160-1400	3	-	-	0,2
ТС6	Ti—Al-V—Cr /						
		Жаропрочные сплавы после отжига					
ВТ8	Ti—Al—Mo—Si	1050	900	10		650	0,35
ВТ9	Ti-A!—Mo—Si—Zr	1150	1000	6		685	0,35
ВТ3-1	Ti—Al-Mo—Cr-Si—Fe	1000	950	12		635	0,4
ВТ9Л	Ti—Al—Mo—Fr	>950		>5	_		**0,2**

Магниевые сплавы

Для обозначения состояний магниевых деформируемых сплавов принята следующая маркировка: М — отожженный; Н — нагартованный; Т1 — искусственно состаренный; Т4 — закаленный; Т6 — закаленный и искусственно состаренный; Т8 — закаленный, нагартованный **и** искусственно состаренный. Химический состав сплавов по ГОСТ 14957—76.

Литейные сплавы в зависимости от режима термической обработки отливок имеют дополнительные шифры **при** марке сплава: Т1 — искусственное старение; Т2 — отжиг; Т4 — закалка; Т6 — закалка и старение. Химический состав сплавов по ГОСТ 2856—79.

Магниевые сплавы, полуфабрикаты которых после горячей деформации или литья не подвергаются термической обработке, дополнительного шифра при марке сплава не имеют.

Таблица 3.13. Механические свойства магниевых деформируемых сплавов [3,24]

£ = 43ГПа: С=16ГПа: ix = 0,33

Система легирования	СПЛАВ	Полуфабрикат								
Mg-Mn	МАШ	Лист	210	120		8	—	—		0,05
	МАШ	Пруток	240	150		4	6	85	130	**0,06**
Mg-Al—Zn —Mn	МА2	Пруток, штамповка	265	165	80	10	30	110	160	0,12
	М.42М	Лист	250	150		18				
Mg-Mn	МА8	Пруток	260	150	—	7	—	—		**0,1**
	МА8М	Лист	250	160		18				
	МА8Н	»	270	190		15				
	МА9	Пруток	270	240		10	и			**0,6**
	МАШ	Лист	250	180	100	15		—	—	
		Высокопрочные сплавы								
Mg-Al—Zn — Mn	МА2-1	Плита, поковка, штамповка, профиль	275	170	100	12	-	85	140	0,08
	МА2-1									
	МА2-1М	Лист	280	180	—	16	—	—	—	
	МАЗ,	Пруток, поковка, штамповка	275	220	100	13	25	—	140	0,1
	МЛЗМ									
	МА5Т4	То же	315	220	130	13	20	140	180	
Mg-Zn-Zr	МА14Т1	Пруток	340	280	150	10	25	160	160	0,08
	МА14Т1	Штамповка, поковка	315	255		13		—.		
Mg-Al-Cd — Ag —Mn	МА10Т6	Пруток, профиль	400	295	130	5	8	240		0,03
		Жаропрочные								
Mg-Ce-Mn	МА11Т6	Лист, пруток	270	140	80	10	12	120	170	0,04
Mg-Th—Zn	МА13Т8	То же	240	180	80	6		125		
	ВМД1	Пруток	300	250	180	5	10	160	160	0,07
	Сверхлегкие сплавы (плотность ***d*** = 1400 и- 1600 кг/м3; £ = 45 -f- 46 Ша)									
Mg-Li—Zn	ВМД5	Пруток, штамповка	160-220	120—180	—	15—40		130—180		0,25-0,9
Mg-Li—Al—Cd	ИМВ-2	То же	210—280	160-250	—	8—20	—	180—240		0,05—0,1

Таблица 3.14. Механические свойства магниевых литейных сплавов [3,24]

£ = 42ГПа; С=15,5ГПа; = 0,34

Система легирования	Сплав, состояние									
		Среднепрочные сплавы								
Mg-Al—Zn	МЛ7-1	180	55	-	16	13	—	110	0,05	450
		180	70	-	18	-	-	-	0,03	550
		Высокопрочные сплавы								
Mg-Al—Zn	МЛ4	170	95	—	4	6	—	130	0,02	500
	Л1Л4Т4	235	85	18	7	15		135	0,04	580
	МЛ4Т6	240	115	45	4	6		145	0,02	675
	МЛ5	155	95	—	1,2	2,5				600
	МЛ5Т4	240	85	30	7	15	80	135	0^5	580
	МЛ5Т6	240	120	45	3	5	—	140	0,05	675
Mg - Zn - Zr	МЛ12	210	105	75	8	9		155	0,05	550
	МЛ12Т1	230	130	85	7	7	130	155	0,04	550
Mg-Zn-La-Z.	МЛ12Т6	250	150	85	6,5	7	130	155	0,04	675
	МЛ15Т1	215	140	80	3,5	5	140	150	0,02	550

Продолжение табл. 3.42

Система легирования										
	Жаропрочные сплавы									
Mg — Nd — Zr	МЛ9Т6	240	145	75	3	6	140	170	0,03	650
	МЛ10Т6	240	120	70	5	7,5	100	170	–	650
Mg — Ce — Zn — Zr	МЛН	130	100	40	3	3,5	100	–	–	600
	МЛ11Т4	150	90	40	5	7	90	120	0,03	600
	МЛ11Т6	160	105	45	3	5	105	120	0,03	650
Mg — Th — Zn — Zr	МЛ14Т1	200	95	50	8	–	–	–	–	600
Mg - Th — Zr	ВМЛ1Т6	200	95	50	6	–	–	–	–	–
	ВМЛ2Т6«	260	120	60	6	8	120	170	0,07	650

Не содержит токсичных и радиоактивных добавок

Медные сплавы и сплавы на основе олова и свинца

Медиые сплавы разделяются на две основные труппы: латуни и бронзы. Латуни — сплавы, легированные цинком (табл. 3.15 и 3.16). Различают простые и специальные латуни. Простые латуни (двойные сплавы) маркируют буквой Л, за которой следует содержание меди в процентах. В обозначении специальных латуней после буквы Л следуют заглавные буквы легирующих элемен-

Таблица 3.15. Прочность и пластичность деформируемых латуней [3,24]

Химический состав по ГОСТ 15527—70; £=102-i-115 ГПа

Тип латуни	Марка латуни	Мягкое состояние			Твердое состояние		
		Og, МПа	6, %	НВ. МПа	Cjj, МПа	6. %	НВ. МПа
Простая	Л96, Л90	240—260	50	550	450—470	2,5	1350
	Л8Б	280	50	570	550	3,5	1400
	Л80, Л70	320	50-55	600	655	4	1450
	Л68, Л62	300—320	45-55	600	700	4	1550
	Л63, Л60	400	45	640	705	3	1600
Алюминиевая	ЛА85-0,5	300	35		500	10	
	ЛА77-2	380	50	550	600	9	1550
	ЛАЖ60-1-1	450	50	550	700	8	1700
	ЛАН59-3-3	550	45	1150	700	9	1800
Кремнистая	ЛК80-3	300	55	1000	650	4	1800
Марганцовистая	ЛЖМц59-1-1, ЛМц58-2, ЛМцА-57-3-1	380—450	40—60	800-950	680—750	5—10	1600—1850
Никелевая	ЛН65-5	400	60	600	700	4,5	1650
Оловянистая (морская)	Л090-1	280	45	570	520	4,5	1450
	Л070-1	350	60	600	700	4	1500
	Л062-1	400	40	800	700	7	1450
	Л060-1	380	40	770	580	4	1500
Свинцовая	ЛС74-3, ЛС64-2, ЛС63-3	300-400	40-60	500—700	550—700	2—6	1000—1200
Муниц-металл	ЛС59-1, ЛС60-1	300—450	35—55	500—800	500-650	- 5	1200—1600

і б л и ц а 3.16. **Механические свойства литейных латуней** [3,24]

Химический состав — по ГОСТ 15527—70

Латунь	МПа	МПа	8. %	кси, МДж/м2	НВ, МПа	Латунь	МПа	"0,2' МПа	8, %	кси, МДж/м^	НВ, МПа
ЛА67-2,5	380	150	15		900	ЛКС80-3-3	340	140	20	0,4	950
ЛАЖМц66-6-3-2	640	350	7	.—	—	ЛМцОС58-2-2-2	340	240	8		950
ЛАЖ60-1-1Л	400	250	20	—	900	ЛМцЖ52-4-1	550	300	20	—	—
ЛК80-3Л	400	160	20	1,2	1050	ЛЛ1цЖБ5-3-1	550	250	10		1050
ЛМцС58-2-2	360	240	10	0,7	850	ЛС59-1Л	340	150	40	0,26	800

Т а б л и ц а 3.17. **Механические свойства деформируемых бронз** [3,24]

Химический состав по ГОСТ 5017—74 и ГОСТ 18175—78

Бронза	*Е*, ГПа	Мягкое состояние			Твердое состояние		
		cj,, МПа	8. %	НВ, МПа	cjg, МПа	8. %	НВ, МПа
БрОФ3-0,8, БрОФ7-0,2	116,5	400-500	60	850-1000	1100—1200	/	2000—2400
БрОФ6,5-0,4	112	450	60	900	800	7	2200
Бр0ф4-0,25	100	340	50	650	600	8	1650
БрОЦ4-3	124	400	35	700	600	4,5	1600
БрОЦС4-4-2,Б, БрОЦС4-4-4	73,5	350	30	700	600	2	1600
БрА5	120	400	65	650	800	4	2100
БрА7	120	470	70	750	1000	3	2200
БрАМц9-2	92	450	30	1100	800	4	1800
БрАЖ9-4	115	450	40	1100	700	4	2000
БрЖМц10-3-1,5	100	500	20	1400	700	9	2000
БрАЖН10-4-4	115	550	35	1500	830	9	2200
БрБ2, БрБНТ1,9, БрБНТ1,7	130	500	40	1400	900	2	—
БрМц5	105	330	40	800	600	—.	1700
БрКМц3-1	115	400	50	900	750	6	1700
БрКНБ3	—	450	25	1000	600	6	2000
БрХ0,7	135	250	25	700	500	4,5	1400

тов и содержание меди **в** процентах, затем через тире — процентное содержание каждого легирующего элемента. Бронзы — сплавы, легированные различными элементами, за исключением цинка **(табл.** 3.17 **и** 3.18). Название бронза получает по основному легирующему элементу: так, сплав меди с алюминием называется алюминиевой бронзой, сплав меди со свинцом — свинцовой и т. д. Маркируют бронзы буквой Бр, в остальном повторяется система маркировки латуней. Сплавы, в которых основным легирующим элементом является никель, именуются медно-никелевыми и имеют специальные названия

Т а б л и ц а 3.18. **Механические свойства литейных бронз** [3,24]

Химический состав — по ГОСТ 613—79

Бронза	Литье в кокиль			Литье в землю		
	МПа	6, %	НВ, МПа	МПа	6, %	НВ, м ш
БрОЦСН3-7-5-1	210	5	600	180	8	600
БрОЦС3-12-5, БрОЦС5-5-5	180	4	600	150	6	600
БрОЦС3-5-7-5, БрОФ10-1	250	3	900	220	3	800
БрОЦ10-2	230	5	750	220	8	700
БрОЦ5-25	140	6	БОО	120	4	400
БрАЖ9-4Л	400	10	1000	500	12	1000
БрАЖМЦЮ-3--1 5	400	12	1200			
Бр.АЖН11-6-6	600	2	2500	600	2	2500
БрСуН6-2	260	6	810	—	—	—
БрСуФ6-1	220	5	800	—	—	—
БрСуСФ6-12-0,3	150	2	600	_	_	_

Т а б л и ц а 3.19. **Механические свойства медно-никелевых сплавов** [3,24]

Химический состав — по ГОСТ 492—73

Название	Сплав	Ё ty	Мягкое		^Твердое	
			я	SS	с. S в"	»
Мельхиор	Л1НЖМц30-0,8-1	145	400	• 45	600	4,0
»	Л1Н19	140	350	40	550	4,0
Нейзильбер	Л1НЦ15-20	140	425	45	650	2,5
»	МНЦС16-29-1,8	125	400	42	650	3,0
Куниаль	МНА13-3		420	12	900	3,0
»	МНА6-1,5		400	35	700	5,0
Копель	Л1НМц43-0,5	120	420	38	650	3,5
Константан	МНМц40-1,5	165	430		670	2,5

(табл. 3.19). Деформируемые медные сплавы поставляются в мягком (отожженном и закаленном), полутвердом (обжатие 10—30%), твердом (обжатие 30-50%) и особо твердом (обжатие более 60%) состояниях.

Сплавы на основе олова или свинца — баббиты — маркируются буквой Б, за которой следует цифра, обозначающая содержание олова в сплаве (табл. 3.20).

Таблиц; 3.20. **Механические свойства баббитов [3]**

Оловянистые баббиты,
химический состав —по ГОСТ 1320—71

В89	80	—	9	100	50	40	250	**0,08**
Б83	90	-	6	115	72	38	300	**0,06**

Свинцовооловянистые баббиты,
химический состав — по ГОСТ 1320—74

Б16	78	76	0,2	123	—	15	300	0,014
БН*	70	70	1,0	107	–	25	290	0,03
БТ**	67	54	11,5	103	–	–	220	0,05
Б6	68		0,2	120	–	23	300	0,015

Кальциевые баббиты
химический состав - по ГОСТ 1208-78

ДК	118	100	2,5	160 1	—	19	320	**0,08**
БК2	95	80	8	**-1**	**-**	–	200	0,12

Жаропрочные сплавы и сплавы на основе тугоплавких металлов

Таблица 3.21. Механические свойства жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов [3,24]

Сплавы, система легирования	cjg, МПа	*0.2- МПа	6. %	Ф, %
1 Никелевые сплавы: деформируемые после закалки и старения				
ХН77ТЮ	1000	600	25	28
ХН77ТЮР	1000	650	20	21
ХН70ВМТЮ	1150	750	14	15
ХН70МВТЮБ	1050	700	16	16
ХН67МТЮБ	1050	650	25	25
литейные после нормализации				
ВЛ7-45У	500	–	5	9
ЖС3	740	–	8	14
ЖС3ДК	1050	–	8	13
ЖС6	1050	–	1	2
ЖС6К	1000		2,5	6
ЭП23	1250	_	2,5	11

Продолжение табл. 3.21

Сплавы, система легирования	МПа	.мНГ	5, %	Ф. %
деформируемые жаростойкие после нормализации				
ХН78Т	780	275	40	
ХН75МБТЮ	850	400	45	
ХН60В	800	320	60	
ХН70Ю	720		75	–
ХН60Ю	710		60	–
2. Кобальтовые литейные сплавы после старения				
ЛК4*	700	–	8	10
ЛК4Я	900		5	5
4К66Я	900	–	6	7

• Литое состояние.

Таблица **3.22. Прочность и пластичность сплавов на основе тугоплавких металлов [3, 6, 24]**

		мпа
Вольфрам	W—30Re, рекристаллизованное	1400
	W—30Re, нерекристаллизованное	**2200**
Молибден	ВМ1 (Mo—**Ti**—Zr-Nb), ЦМ2А (Mo-Ti—Zr), ЦМ6(Mo—Zr). ВМ2 (Mo—Ti—Zr—Nb) после отжига	
	МР47ВП (Mo—47Re)	
Ниоби)	ВН-2(Nb—Mo), деформированное	23
	ВН2А(Nb—Mo—Zr), деформированное	4,5
	ВН-3(Nb—Mo—Zr), деформированное	18
	ВН-4 (Nb—Mo—Zr—La или Ce), рекристаллизованное	
	ВН-5А (Nb-Mo—Zr-La или Ce), рекристаллизованное	
	РН-6(Nb—.Mo-W—Zz), рекристаллизованное	
	МН-1, рекристаллизованное	670
	МН-1, закаленное	760
	МН-2, рекристаллизованное	1050
	Та—10W, рекристаллизованное	950
	Та—10W, деформированное	1350
Хром	ВХ2, ВХ2И	400
	ВХ4	**1100**

Композиционные материалы

Композиционные материалы имеют ориентированную структуру и могут быть разделены на волокнистые материалы, матрица которых содержит упрочняющие одномерные наполнители (волокна, проволоки, нитевидные кристаллы), на слоистые композиции — набор чередующихся жестко связанных двумерных армирующих элементов (листов, фольг и т. п.) и на дисперсно-упрочненные материалы, содержащие равномерно распределенные и не растворяющиеся в несущей матрице ультрадисперсные частицы.

Таблица 3.23. **Механические свойства композиционных материалов однонаправленной структуры на полимерной матрице [12, 13]**

Наполнитель	Матрица	Объемное содержание теля. %	р, кг/м"	МПа	"в. сж' МПа	МПа	^СДВ- МПа	rfia	кси. МДж/м^	
Борное волокно	Эпоксидная	50	2000	1600	2500	1600	100	210	0,06	0,4
	Полиамидная	50	2000	1000	1250	1550	60	250	0,11	
Углеродная лента	Эпоксидная	50	1400	800	400	1000	30	120	0,05	
	Полиамидная	52,5	1300	400	300	800	26	80	0,04	
Углеродный жгут	Эпоксидная	60	1500	1100	450	1300	45	180	0,045	
	Полиамидная	57,5	1400	910	400	1100	30	140	0,04	
Органическое волокно	Эпоксидная	70	1350	1800	290	675	49	80	–	2.3
Стеклянное волокно	)»	75	2000	1800	700	900	30	55		3

' При межслоновом сдвиге.

Таблица 3.24. **Механические свойства композиционных материалов однонаправленной структуры на металлической матрице [5, 13, 14, 24]**

Наполнитель	Матрица					Наполнитель	Матрица				
Борное волокно	Алюминий	50	2600	1350	240	Берилл иевая проволока	Сплав Al—Atg—Si	50	2300	680	195
То же	Сплав Al-Mg-Si	50	2600	1450	240	Молибденовая проволока	Сплав Ti—Al—V	30	6250	1400	195
»	Магний	50	2150	1200	220						
»	Магний литой	75	2400	1350	335	Вольфрамовая проволока	Никелевый литейный сплав	50	14000	700	—
Углеродное волокно	Алюминий	40--50	2200—2400	650—1250*	125-260*						
То же	Никель	50	5300	560	240	Нитевидные кристаллы SiO^	Алюминий	50	2450	800	
»	Цинк	35	5260	780	120						
»	Свниец	40	7350	730	205						
Стальная проволока	Алюминий	40	4740	1500	120	Частицы HfO**	Никель-	2,5	8900	510	–.
		15	3470	850	90						
						Волокна SiC	Титан	25	4300	940	210

* в зависимости от типа углеродного
** Дисперсно-упрочненный материал.

	р, кг/м»	вщ, МПа	^{o}В.Изг, МПа		Я, ГПа	6р. %	10^ М^</м
Асботекстолит	1700	65	100	145	]5		3
Винипласт	1400	50	110	90	4,0	да	15
Гетинакс	1350	160	140		1,5		1,4
Дифлон	1200	70	105	85		50	13
Капрон	1140	55	95	90	1,0	100	11
Капрон вторичный	1150	35	45	60			2,5
Капрон, полиамид, анид стеклонаполненный	1350	130	200	115	6,5	2	2,5
Пенопласт ПС-1	100	—	—	1	0,05	—	0,11
Пенопласт ПХВ-1	200	4,5	4	2,6	0,18	6	0,15
Пенопласт ФК-20-СТ стеклонаполненный	450	10	—	24	–	–	0,7
Пенополиуретан ПУ101Т	200	—		3,3	—		0,04
Полиамид П-68	1110	50	80	90	1,5	100	15
Полиамид, наполненный тальком и графитом	1140	60	80	80	1,15	100	10
Полипропилеи	910	32	75	100	1,15	600	—
Полистирол	1050	35	100	100	2,5	1,5	2
Политетрафторэтилен (Фторопласт-4)	2200	20	12,5		0,45	300	10
Пол итетрахлорэтилен (Фторопласт-3)	2120	37	70	50	1,15	30	2-16
Полиуретан	1200	55	75	—	0,01	55	1,1
Полиэтилен БД	920	14	15	12	0,2	150	–
Полиэтилен НД	950	22-32	20—35	20-35	0,7	200	
Пресс-материал	1400	50	60	200	5		1,2
Стекло органическое:							
неориентированное	1200	75	105	—	3	4	1,3
ориентированное СОЛ, СТ-1	1200	80	105	–	3	20	3
ориентированное 2-55, Т2-55	1200	105	150	–	4	3	3
Стекловолокнит АГ	1700	405	410	260	22		15
Стеклопластик СВАМ	1900	460	460	420	35	–	30
Стеклотекстолит КА СТ-В	1900	320	150	110	20	0,8	8
Стеклотекстолит ЭФ 32-301	1800	400	400	255	21	—	15
Стеклотекстолит ВФТ-С	1800	350	330	170	21		15
Текстолит ПТ	1300	85	140	130	10	1	3,5
Этрол ацетилцеллюлозный	1400	55	50	55	2,25	7	2
Этрол нитроцеллюлозный	1900	30	35	20	2,3	25—50	0,6
Этрол этилцеллюлозный	1200	12	34	17	2,2	50—100	1,5

Таблица 3.26. **Механические свойства металлокерамики*** [3,24]

Тип сплава	Металлокерамика, композиция	о МПа, при			Ф. %	НВ, МПа
		растяже-	сжатии	изгибе		
Сплавы на основе железа	Спеченное железо	195	300	—	4	540
	То же после деформации 69—70%	275	370	–	6	760
	Спеченная углеродистая сталь	300	540	–	5	960
	Спеченная нержавеющая сталь после деформации 60-70%	565	720	—	16	1600
	Сплав 22Fe + 20Ni + Mo	1000	1650	—	7	2700
Твердые сплавы	WC-Co: ВК2, ВК3, ВК8			1000	–.	900
	ВК10, ВК11, ВК15			1500		900
	WC-TiC—Co: Т5К10, Т14К8, Т15К8			1100		900
	Т30К4, Т60К6	–	–	750—900	–	900

Изготавливаются методом порошковой металлургии.

Продолокение табл. 3.42

	Металлокерамика, композиция	МПа, при			л. %	НВ, МПа
		растяже-нии	сжатии	изгибе		
Тяжелые сплавы	W—Co-Ni(Cu. Cr)	1000	2800			2250
Фильтры	Бронза Си—Sn	30-40	100—120	–	3	
	Низкоуглеродистая сталь	1—7	30-250	–	–	
	Нержавеющая сталь	5-120	–	–	0,8	–
Керметы	70Al2O3 + 3OCr	250	2300	390	–	–
	80TiC + 2OCo	–	3150	1050	–	–

Таблица 3.27. Механические свойства керамики [3, 24]

Керамика	р, кг/м"	а^, МПа, при			*Е.* ГПа
		растяжении	изгибе	ежа™.	
Глиношамотная с грубозернистой структурой	2100	6—10	10—20	30-90	—
Глиношамотная с тонкозернистой структурой	2170	25	25—70	80—150	–
Фарфор	2350	30—60	50—120	400—500	
Каменное литье	2900	–	40-65	330—450	90
Керамика из оксидов:					
AljOs (корунд)	3990	260	150	4000	382
Be,Oз	3020	105	–	2100	272
MgO	3580	98	ПО	1400	214
ZrO_2	5600	148	233	2100	172
ThOg	9690	100	–	1500	140

Таблица 3.28. Механические .свойства неорганических стекол и ситаллов [3, 24]

Стекло, ситалл	р, кг/м«	МПа, при			*Е.* ГПа
		растяжении	изгибе	сжатии	
Стекло:.					
кварцевое непрозрачное	2100	40	45	350	0,6
кварцевое прозрачное	2200	60	110	650	0,65
электровакуумное	2100—2500	50-100		800-200	
электроизоляционное	2500		40-65		O!7
Ситалл:					
магнезиальный	2500—2850	–	160	–	0,12
пироксеновый	2900		400		0,14

Таблица 3.29. Механические свойства резин [3]

Резина	МПа	«р. %	Резина	Ojj. МПа	«р. %
Амортизационная	10—16	400-600	Маслостойкая мягкая:	4-12	250—600
Губчатая	0,02—0,1	–	» средней твердости	4—16	200—350
Ячеистая и пористая из твердых каучуков	0,01—5	20—300	» твердая	4—20	120-300
			Морозостойкая на основе СК МС-10	15	200
Кислото- и щелочестойкая:					
на основе СКБ	4,5—10	200-350			
на основе СКС	20-25	300-500	Стойкая к гидравлическим	*13*	
на основе ХП	18—24	200-500	жидкостям на основе СКИ		

Минералы и волокна

Таблица 3.30. Твердость минералов

	Состав, химическая формула	Твердость по шкале Мооса	Другие свойства
Агат	SiO^	6,5	£ = 98 ГПа
Азурит	2CuCO3 • Cu(0H)2	3,5	
Алмаз		10	£ = 740 1000 ГПа; = 240--480 МПа; //^1= 10 000 ГПа
Альмандин (гранат)	РезА1,[510,]з		Н„ = 1230 ГПа
Андрадит (гранат)	$Ca_3Al_2[SiO_4]_3$	7	
Андалузит	Al_2SiO_5	7	
Барит	$BaSO_4$	3,5	
Берилл	$Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$	8	= 1120 4- 1450 ГПа
Виллемит	$Zn_2[SiO_4]$	5,5	
Волластоинт	$CaSiO_2$	4,5	<'в.изг - 1J20 4- 1450 ГПа
Галенит	PbS	2,5	
Галлит	NaCl	2	
Гематит	$FeSiO_2$	6	
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2	
Горный хрусталь	SiO_2	7	
Графит	C	1,5	=4,5-^-6 МПа: о^ = 15 -ь 29 МПа; = 11,8 ГПа
Гроссуляр (гранат)	Ca3Al,[SiOj3		
Кальцит	CaCOз		
Кварц	svo,		1100 ГПа
Кианит	AiaSiOs		
Корунд	AUO3		Я,, = 2050 ГПа
Крокидолит-асбест	ЗН2О • 2Na20 • 6(Fe. Mg) О • гРе^Оз • 17810-[A1SiOJJSO, CI,	5,5	
Лазурит		4	°в. сж = 88,5 МПа
Магнезит		4	
Малахит	CU2 [CO3] ***(OH),***	4	
Миллерит		6	£ = 35 ГПа
Муллит	3Al2O3 • 2Si02	2,5	Ов = 170 н- 355 МПа; ^^ = 420 -г- 540 МПа
Мусковит	KAb(AISi30i„)(0H)2		
Опал	$SiO_2 \cdot H_2O$	6	
Перовскит	$CaTiO_3$	6	
Пиролюзит	MnO_2	5,5	
Пироп (граиат)	$Mg_3Al_2[SiO_4]_3$	7	
Пирофиллит	$Al_2[Si_4O_{10}][OH]_2$	1,5	
Реальгар	AsS	2	
Рутил	TiO_2	6	
Сепиолит	$2MgO \cdot 3SiO_2 \cdot nH_2O$	2,5	
Силлиманит	Al_2SiO_5	7	°в. еж = 45 ^ 60 МПа
Спессартни (гранат)	$Mn_3Al_2[SiO_4]_3$	7	
Тальк	$Mg_3[Si_{,,}0_{,,}][0Hk$ A1JSiOJ [FeOHla	1	
Турмалин	[Ni. Ca](NaAl)«[SieAl3B3(0. OH)з„]	7	
Уваровит (гранат)	СазСг2[8!0,]з	7	
Флогопит	KMgJSisAlOiJ [Fe. OH^	2,5	: 205 265 МПэ
Флюорит	CaF,	4	
Хризоберилл	A1гBe04	8,5	
Хризотил-асбест	H,Mg3Si,09		£ = 158 210 ГПа; °в. сж -= 590 785 МПа
Циркон	ZrSiO^	7,5	
Шеелит	CaWO^	5	
Шорломит (гранат)	Саз(А1. Fe. Ti)(Si, T^OJs	7	

Таблица 3.31. Механические свойс- [31

Волокно	tp-.O-^M в сухом состоянии	Потери прочности в мокром состоянии, %	- е . состоянии		ajj. МПа	Е, ГПа
				МОКРОЕ		
			Натуральные волокна			
Асбест		-			300	155—205
Бамбук	–		–	и	345	33
Лен:						
технический	40	0	2 - 3	2 - 3	490-590	
элементарный	63	0	2 - 2, 5	2 - 2, 5	785—980	
Хлопок:						
средневолокнистый	24	0	6—8	7 - 9	245-390	
тонковолокнистый	35	0	6—8	7 - 9	390—540	
Шелк	35	20-30	15—20	20—25	440—490	
Шерсть:						
грубая	12	30—35	25—30	25-35	145—195	
тонкая	14	30—35	30—50		195—245	
			Химические волокна			
Альгинат	10—14	60—70	10—14	25-26	—	
Ацетат (виполян, викара, адрил)	11 — 14	40—45	22—30	28—35	175—215	
Белковое (казеин)	7—13	40—60	30—50	50-70	90—155	
Винилон, винид	80-100	10—15	8—10	13—18	1030-1270	2,5—10,8
Вискозное кордное:						
обычное	27-30	35—40	10	16	340-390	
высокопрочное	40—55	25—30	15	25	640—735	
Вискозное:						
медноаммиачное	15—23	35-40	10—17	15—30	225-315	–
штапельное	15—20	55	20—25	20—30	225—300	–
Ветрелон (полиамидное)	23—29	6	13—18	15-19	–	2,7
Гидратцеллюлоза	30-40	20	8—10	12-13	–	8-9,8
Капрон, нейлон, дедерон	40—50	10	20—25	–	480-625	–
Лавсан	45-55	0	9—12	15—18	450-540	–
Нитрон, орлон	45-55	2—6	14—17	14—16	510—610	–
Совиден	16—36	0	15—25	–	260—590	–
Триацетат, ариел. курплет	10—15	20-25	20—23	35—40	135	4,5
Фторлон	45—55	0	6 - 9	6—9	880—1050	14,7

Таблица 3.32. Механические с волокон, проволоки и нитевидных кристаллов для армирования композиционных и высокомодульных материалов [14, 15, 24]

Волокно, проволока, кристалл	Р кг/м-	'в. ГПа	Е, ГПа	-р. %	Волокно, проволока, кристалл	к//м3	"в- ГПа	Е. ГПа	
Волокно:					стальная	7800	3,5-4	200	2-2,5
борное	2630	2,5—3,5	380—450	0,7—0,8	титановая	4500	1,5-2	120	1,8—2
углеродное	1700	2—3,2	200-500	0,7—1,0	молибденовая	10 000	1,75	350	1,3
стеклянное	2540	3,9—4,6	95—100	4-5	Нитевидные кристаллы («усы»):				
органическое	1350	2,8—3,5	120-130	2-2,5	графита	2260	21	100	
карбида кремния	3210	2—4	400—500	0,3—0,5	оксида алюминия	3960	28—42	500	–
оксида алюминия	3960	2,1—2,6	500	–	нитрида алюминия	3300	15	380	-
оксида циркония	6270	2,4—2,7	480	—	карбида кремния	3210	21—37	580	—
Проволока:					нитрида кремния	3180	15	495	–
бериллиевая	1840	1-1,5	290-320	–					
вольфрамовая	19 300	2,4-4,2	400	2-3					

3.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Механические свойства при температуре ниже 20 °С определяются *цо* ГОСТ 11150—84, выше 20 "С — по ГОСТ 9651—84. Методы определения ползучести и длительной прочности регламентируются ГОСТ 3248—81 и ГОСТ 10145—80 соответственно.

Температурные зависимости механических свойств для каждого класса материалов достаточно близки. Наиболее чувствительны к влиянию температуры свойства, характеризующие сопротивление пластической деформации (твердость, пределы прочности и текучести), а также ударная вязкость. Упругие свойства металлов и сплавов изменяются с температурой в меньшей степени. Напротив, модуль упругости некоторых неметаллических материалов с понижением температуры до —60 **°С** может снижаться более чем в 2 раза.

В табл. 3.33—3.46 и на рис. 3.2—3.21 при температурах от —253 до -f2400 °С приведены характеристики Оо2, ств, 6,4' и КСи, определение которых даис в § 3.1, а также о^ g/^ и о' при высоких (до 4-1600 °С) температурах, где 0о,2/г—предел ползучести — наибольшее постоянное напряжение, которое за определенное время т (обычно 100 или 1000) при постоянной температуре *t* вызывает остаточную деформацию, ие превышающую заданного значения (как правило, 0,2%); о ' —предел длительной прочности — наибольшее постоянное напряжение, вызывающее разрушение за определенное время т при постоянной заданной температуре *t.*

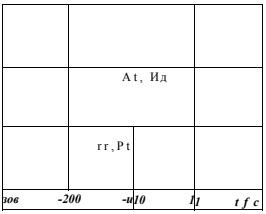


Рис. 3.2. Зависимость модуля упругости некоторых материалов от температуры [3, 6] (значения модуля упругости при 20 °С см. в табл. 3.1)

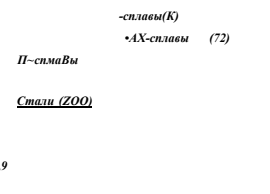


Рис. 3.3. Зависимость модуля упругости сталей и сплавов от температуры [3, 5, 10]. (В скобках — значения модуля упругости при 20°С — Г П а)

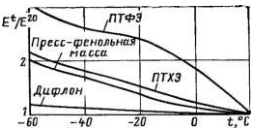


Рис. 3.4. Зависимость модуля упругости металлов от температуры [24], для дифлоиа £2°=2,45 ГПа, для ПТХЭ (фторопласта-3) £2°= 1,45 ГПа, для ПТФЭ (фторопласта-4) 850 МПа, для пресс-фенольной массы Е^=7,9 МПа)

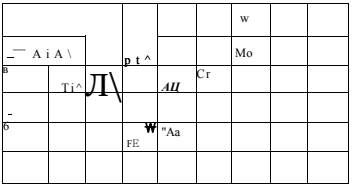


РиС. 3.5. Зависимость модуля упругости металлов от температуры [3, 6]. Значения модуля упругости при 20 °С см. в табл. Ь.1)

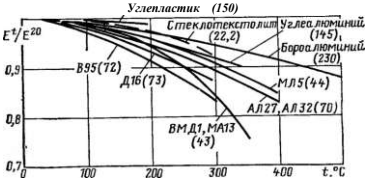


Рис. 3.6. Зависимость модуля упругости материалов от температуры с повышением ее до 500 "С [3, 14, 24]. (В скобках — значения модуля упругости при 20 °С — Е Z . ГПа)

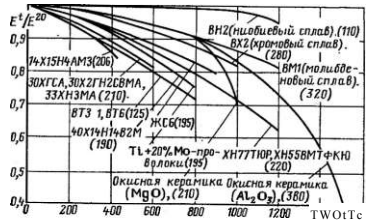


Рис. 3.7. Зависимость модуля упругости матеоиалов от температуры с повышением ее до 1200 "С [3, 24]. (В скобках — значения модуля упругости при 20°С — £ ® , ГПа)

Таблица 3.33. Механические свойства металлов при низких температурах [3, 6, П]

Металл	МПа, при i, °С				МПа, при t, °С								
	20	-196	-253	20	-196	-253	20	-196	-253	20	-196	-253
Алюминий	120	210	350				30	42	45	85	75	65
Бериллий	300	270	—	200	230							
Ванадий	420	1080	—	—			14	3,5				
Железо	360	830	1060*	260	780	1060*	27	4	0,6*	88	54	**73***
Магний	120	160	210	—			5	5	5	10	7	**8**
Медь	240	380	460	—	—		29	41	46	70	72	74
Молибден	490	540	540	—	—	—	3	0	0	3	3	4
Натрий	***14***	19	40	—	—	,—	19	13	60			
Никель	390	600	750*	125	145	145*	54	61	62*	85	80	75*
Ниобий	350	1030	1120				30		7			
Олово	36	71	73									
Свинец	28	45	70	—	—	—	26	34	36~	—	—	
Серебро	180	290	360	—	—	—	39	82	88	90	88	80
Тантал	620	1030	1150*	560	1030	1150*	13	6	0,6-	69	74	77*
Титан	750	1190	1340*	660	1080	1340*	18	12	1*	48	16	4*
Титан иодидный	250	630	—	154	440	—	50	11,5		78	28	
Цирконий иодидный	260	470	680*	140	230	160*	35	49	47*	52	58	52*

• при температуре -269

Сталь, сплав, термическая обработка	$\sigma_в$, МПа, при t, °С				δ, % при t, °С			
	20	-70	— 196	-253	20	-70	-196	-253
Стали								
Ст. 45, нормализация	600	—	1050	1400	400	—	950	1400
Ст. 45, закалка и отпуск	1000	1050	1320	—	890	960	1280	
30ХГСА, закалка и отпуск	1200	1300	1580		1100	1180	1500	
40ХНМА, закалка и отпуск	1100	1300	1550		980	1080	1400	
30ХГСНА, изотермическая закалка	1600	1700	1900		1200	1230	1450	
40ХГСгаВА, закалка и отпуск	2100	2200	2400	—	1450	1480	1700	
12Х18Н9Т, закалка	620	1150	1650	1900	250	300	370	420
08Х15Н5Д2Т, закалка и отпуск	1150	1230	1500	1750	1000	1080	1350	1650
10Х12Н20Т3Р, закалка й старение	1080	—	1100	1450	620		1100	880
12Х14Г14Н3Т, закалка	750		1400	1500	500		500	600
08Х16Н6, закалка, обработка холодом, старение	1350	1500	1750	1850	1250	1350	1650	1800
45Л, отпуск	770	**850**						
27ХГСНЛ, изотермическая закалка	1450	1500	—		1250	1350		
35ХГСЛ, закалка и отпуск	950	1030	1350	—	—	—	—	—
Титановые сплавы								
ВТ5-1, отжир	750	950	1350	1600	650	850	125	1550
0Т4, отжиг	810	870	1220	1500	660	830	115	1300
ВТ6, отжиг	100	120	1650	1850	950	1150	155	1650
ВТ5Л	850	1000	1350	1500	820	950	1300	1300
ВТ20Л	1000	1100	—					
ВТ21Л	1100	1200						
Алюминиевые сплавы								
АДШ	80	95	170	260	30	30	40	54
АМГ6М	320	350	470	545	170	175	185	195
АДЗЗТ1	310	350	410	530*	270	310	350	390*

Продолокение табл. 3 . 4 2

Сталь, спjав, термическая обработка	МПа. при *t*, с				^0.2- 1, при *i*, ' *C*			
	20	—70	-196	-253	20	-70	-196	-253
Д16Т	440	470	550	700	290	330	420	520
Д16Т1	495	535	685	720*	455	**490**	575	625*
1201Т1	430	460	530	680	320	**380**	410	490
В92Т1	440	470	510	610	320	330	360	400
В93Т1	490	520	580		450	470	530	
В95Т1	600	620	750	810	550	560	640	730
САП-1	320	380	480	560	220	260	350	450
АБм1	400	420	530	—	280	280	**400**	
АЛ4Т6	350	420	370	470	320	320	**360**	450
АЛ19Т4	320	320	370	390	210	210	250	330
АЛ9Т5	210	245	270		90			
ВАЛ8Т5	400	430	480		340			
АЛ27Т1	350	430	300	270	250	230	280	260
			MazHuet Iые сплавы					
МА2М	250	300	370	430	140	180	210	230
МА2-1М	270	290	380		180		**315**	
МА14Т1	320	410	470	480	260	**360**	**380**	400
МЛ4	200	200	220					
МЛ5Т6	240	240	240		—			
МЛ10Т6	240	300	320					
МЛ15Т1	210	210	220	—	–	—	–	–
			Медные сплавы					
ЛС59, мягкая	450		590	680	—	—	—	
твердая	630		840	950	—	—	–	
			Никелевые сплавы					
ХН77ТЮР, закалка и старение	**1300**	—	**1360**	**1050**	**690**			
ХН77ТЮ, закалка и старение	**1200**		**1400**		**800**		650	
ЖСКП	**1400**	—	**1650**	**1630**	**1000**		1200	500

При температуре —269 "С.

Таблица 3.35. Пластичность и вязкость сталей и сплавов при низких температурах [3,5,19]

Сталь, сплав, термическая обработка	б, Уо, при 'С				◁ %, при *t*, "С				КСи, МДж/м², при *t*, *"С*		
	20	—70	-196	-253	20	-70	-196	-253	20	—70	-196
45, нормализация	—	—			55		38	0			
45, закалка и отпуск	13	—	13	—-	52	52	48		1	0,6	0,1
ЗОХГСА, закалка и отпуск	14	14	7	—	50	47	13		**0,7**	**0,4**	0,15
40ХНМА, закалка и отпуск	17	13	12	—	55	50	27		**1,1**	**6**	0,4
ЗОХГСНА, изотермическая закалка	13	14	2,5	—	52	53			0,9	0,45	0,1
40ХГСНЗВА, закалка и отпуск	11	13	10	—	43	45	14		0,55	**0,55**	0,15
12Х18Н9Г, закалка	40	37	30	25	—	—	—	—	1,3	**1,6**	2,0
08Х15НД2Т, закалка и отпуск	10	11	13	8	50	48	47	35			
10Х12Н20Т3Р, закалка и старение	30	—	30	10	—					—	2,2
12Х14Г14Н3Т, закалка	45	—	40	35							
08Х16Н6, закалка, обработка холодом, старение	—	—	—	—	58	53	45	40	1,5	2,3	2,2
45л, отпуск	18	17	—	—	35	20			0,75	0,35	
27ХГСНЛ, изотермическая закалка	8	10	—	—	45	40			0,6	0,35	
35ХГСЛ, закалка и отпуск	15	15	6	—	50	50	10	–			–

Сталь, сплав, термическая обработка	%. при *t.* С				%, при *t.* °С				КСи, МДж/м^ при *t.*		
	20	—70	-196	—253	20	-70	-196	-253	20	-70	-196
Титановые сплавы											
ВТ5-1, отжиг	10	8	6	3							
014, отжиг	24	15	12	–	—	—			0,5	0,3	(1,2
ВТ6, отжиг	16	15	12	3	33	33	30	4	0,4		0,3
ВТ5Л	9	И	8	3	25	25	14	14			
ВТ20Л	10	5									
ВТ21Л	10	2	—	—	—	—	-	—	-		-
Алюминиевые сплавы											
АДШ	35	45	50	45	—	—	—	—	—	—	—
АМГ6М	17	23	31	34	29	50	33	27			
АД33Т1	15	.—	20	23*	42	—	39	34*			
Д16Т	14	13	10	16	16	16	15	—	0,24	0,24	0,:
Д16Т1	8	6	7,5	9,5*	17	14	13	14*			
120] Т1	10	11	13	10							
В92Т1	14	19	17	11							
RQ4TI	*1*	g	g								
В95Т1	10	9	7	5	13	15	9	—	0,15	0,1	0,
САШ	5	7	8	10							
АБМ1	15	16	35		20	16					—
АЛ4Т6	3,5	2,5	2,5	1	5	6,5	3,5	3	0,03	0,03	0,1
АЛ19Т4	9,5	9,5	6	5							
АЛ9Т5	2	2,5	2,8	—	—			.—	—		
ВАЛ8Т5	4	4	3,5								
АЛ27Т1	15	25	2	0,1	20	28	3	0,5	—	—	—
Магниевые сплавы											
МА2М	25	23	10	8							
МА2-Ш	15	9	2,5								
МА14Т1	13	8	2,5								
МЛ4	8	6	5	—	12	9	4				
МЛ5Т6	5,5	4	2	—	7	5	4	—	**0,035**	**0,025**	**0,05**
МЛ10Т6	5	5	4								
МЛ15Т1	3,5	1	1								
Медные сплавы											
ЛС59, мягкая	32		37	34	35	—	38	35	—	—	
БрОФ6,5—4, твердая	12	—	29	29	61	—	54	51	—	–	–
Никелевые сплавы											
ХН77ТЮР, закалка и старение	25	—	18		20		15		0,5	—	0,35
ХН77ТЮ, закалка и старение	28	—	30	18	35	—	28	8			
ЖС6КП, закалка	20	—	15	13							

При температуре -269 °С.

Таблица 3.36. Механические свойства сталей при высоких температурах [3,24]

Стали	Og. МПа, при *t.* С						"0,2- МПа, при *t.* 'С						6, %, при *t. °С*					
	20	200	300	400	500	600	20	200	300	400	500	600	20	200	300	400	500	600
10	430	495	525	380	260	по	265	225	180	170	160	95						
20	480	440	450	360	220	130	270	230	180	150	130	90						
45	640	700	730	575	385	220	365	355	265	230	180	80						

Продолжение табл. 3.42

Стали	$\sigma_в$, МПа, при t, °С						$\sigma_{0,2}$, МПа, при t						8, %, при t, °С					
	20	200	300	400	500	600	20	200	300	400	600	600	20	200	300	400	500	600
38ХА, 40Х	950	900	890	700	500													
40ХФА	950	925	860		505	385	860	825	760	720	420		26	22	19		30	50
30ХМА	950	800		740	570		750	650		600	500		12	20		19	19	
30ХГСА, 40ХНМА	1100		1000	920	700	550*	950		840	800	650	500*	13		11	16	21	27*
12Х2НВФА	1150		1020	1050	1020		950		900	920	920	—	17		14	15	12	
30Х2Н2ВФА	1180	—		1050	920		1090			930	860	—	15			12	12	
30ХГСН2А	1600	1600		1500	1150	—	1350	1350	—	1250	1050	—	9	9		11	9	—
12Х18Н10Т	650	—	450	450	450	400	300	—	200	180	180	180	40	—	30	30	30	25
14Х17Н2	1200		1120		950	380	900		840				8		8		16	30
09Х15Н9Ю	1200	изо	1050	1000	750		950	900	850	800	500		10	8	8	8	10	
08Х17Н5М3	1200			1100	950		1000			850	600	500*	10		—			10*
20Л	440	430	450	370	230		260	240	200	170	130		30	22	21	32	45	
20ХМФЛ	600	580	550	520	480	350	400	400	390	370	340	280	18	14	13	14	15	20
30ХНВЛ	850	790	820	720	580	330	700	630	600	560	500	300	18	16	16	14	15	19
12Х13Н3ВФЛ	900			780	620	400	750			610	480	270	10	—		6	9	17
23Х6Н2МВФА	920	—	730	650	550	370	700		610	570	520	340	12	—	14	15	16	24
08Х17Н3СЛ	1200	—	—	ИЗО	1040	—	1100	—	—	970	910	—	8	—	—	6,5	7	—

Испытано при температуре 550 °С.

Таблица 3.37. Механические свойства титановых сплавов при высоких температурах (3,10]

Сплав	$\sigma_в$, МПа, при t, °С						$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С						6, %, при t, °С					
	20	200	300	400	500	600	20	200	300		500	600	20	200	300	400	500	600
ВТ1-1	450		220	150			380		180	150			25		30	35		
0Т4-1	650		380	310			470		290	260			20		23	17		
0Т4	750		490	460			600		430	390								
ВТ5	800		480				700		380	350			15					
ВТ5-1	750	680	550	510	490	380	650		460		—		15	10	17	15	20	26
АТ4	900		680	600			850		600	550			15		17	20		
ВТ6	1000	—		580	530		900			500	420		8			9	16	
ВТ6С	920	670			510		870	580	—	—	400	—	10	11			15	
ВТ8	1070	860	830	770	730	600	920	710	690	630	570	400	10	10	9	8	8	9
ВТ9	1150	950	920	850	800	720	1030	—	740	720	660	550	6		10	7	7	9
ВТ3-1	1000	910	840	760	700	530	950	740	660	630	560	250	12	11	9	8	10	18
ВТ20	1000	780	730	700	650	470												
ВТ5Л	900		400	350	300								8		8	10	13	
ВТбЛ	900		550	500									9		9	9		—
ВТ9Л	950		710	560	640	250*							9		9	7	8	5*
ВТ20Л	1000	—	670	610	560								10		10	10	12	
ВТ21Л	1100	–	700	670	630								10	–	10	11	12	–

При температуре 800 °С.

Таблица 3.38. Механические свойства алюминиевых сплавов при высоких температурах [3,5]

Сплав, состояние	$\sigma_в$, МПа, при t, °С						МПа, при t, °С						5, %, при t, °С					
	20	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250	300
АД1М	80	—	60	42	28	18	30		29	25	17	10	35		55	65	75	80
АД1Ш	150	135	по	42	28	18	100		45	28	14	10	6	7	П	55	65	80
АМг2М	190	170	160	130	110	70	80	80	70	60			23	26	35	50	60	75
АМг2П	260	260	220	160	80	50	210	210	190	100	50	35	14	16	25	40	80	100
АМг2Н	290	–	250	160	90	50	260		210	100	70	30	8		25	40	60	100
АМг6М	320	300	250	190	160	130	170	150	130	120	100	80	24	30	37	43	45	48
АД33Т1	310		240	200		90	270		200	180		80			11	11		8
АК8Т1	490	–	410	340	230		450		370	310	220		1	—	14	13	14	
Д1Т	410	_	280	150	90	50	250	_	210	ПО	65	35	15	_	16	28	45	95

Сплав, состояние	МПа, при *t*, °С						ао,2. МПа, при *t*.						6, %, при л °С					
	20	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250	300		100	150	200	250	300
Д16Т*	*iW*	—	^	330	220	1М	290	—	265	Ж		115	ш		19	11	13	13
	520	—	440	420	290	190	380	—		—			16		14	9	**10**	12
ВАД1Т	430		–	340	270	170	280		230	210	140		18			20	**16**	18
А К 4 - т	420	—	360	320	250		360		330	290	230		7		7	10	11	
Д20Т1	420	–	350	300	230		320		280	250	190		10		13	14	15	
191БТ1	380	325	290	250			310	280	250				10	14	18			
В92Т1	480	410	330	280	–	–	370	300	270	240			7	10	16	14		
В93Т1	490	430	380	–	–	–	450	400	340				7	6	4			
В95Т1*	*bJO*	480	4Ш	*Ш*		–		4Ю	350	240	*Ш*	–	14	14		11		–
	600	530	430	330	160	-	550	500	400	310	150	—	8	8	7	—	16	—
АЛ 115	–	–	–	180	175	130										1,5	1,9	4
АЛ3Т5	220	–	–	180	150	100		—			—		0,8	1	1	1,4	1,5	4
АЛ32Т5, Т6	245	–	225	210	150	–	180		175	170	125		2		2,5	4	4	
АЛ4МТ5	340	300	280	260	180	145	250						3	2	2,5	3	3,5	6
АЛ4Т6	240	220	190	160	ПО								3	3	3,5	4	5,4	5
В124Т6	360	–	·—	300	220	130		·–					0,5			1	1,5	**2,5**
В124Т6К*»	415	–	–	310	210	140							2,5			3,5	4	**6**
АЛ19Т5	370	–		280	200	150	280			220	160	100	5			3	4	5
АЛ33Т5***	280	–	–		210	160	180				150	100	2				2	2,5
АЛ9-1Т5	270	–	210	210	140		150		150	170	130		5		15	6	4	
АЛ9-1Т6К**	320	–	240	200	130		240		200	180	120		7		12	6	6	
ВАЛ8Т5К**	400		340	300	220	130	–	–				–	4	–	8	9	10	И

для катаных полуфабрикатов, в знаменателе — для прессованных.
· Литье в кокиль, остальные — в землю.
• При температуре 350 °С: а°=100 МПа; =0,2=70 МПа; 8=5 %.

Таблица 3.39. Прочность порошковых алюминиевых сплавов и композиционных материалов на алюминиевой и магниевой матрице при высоких температурах [5,14,24]

Материалы	Ojj, МПа, при /, °С							
	20	100	200	250	300	1 350	400	500
САП-1	300	260		180		120		60
САП-2	350			210		130		85
САП-3	400			240		180		90
Алюминиевый сплав + 50% борного волокна	1200	1100	1050	1000	950		900	800
Алюминий + 40% углеродного волокна	1200	1180	1150	1100	1080	1050	1000	
Алюминий+ 40% бериллиевой проволоки	560	510	420	390	340			
Алюминий+ 50% кварцевого волокна (SiOg)	840	820	780		730		470	390*
Магний + 25% борного волокна	920		900		770		730	650
Магний + 50% борного волокна	1200							800*

При температуре 450

Таблица 3.40. Механические свойства магниевых сплавов при высоких температурах [3,24]

Сплав, состояние	МПа, при i							^0,2. МПа, при °С							6. %, при t. °С						
	20 1	100	150	200	250	300	350	20	100	150	200	250	300	350	20	100	150	200	250	300	350
МА2	270	210	165	115	75		-	170	115						10	30	45	60	75		
МА2-1	300	225	190	130	90	70	-	200	115	95	75	45	40		14	19	30	35	45	50	
МА5	310	220	170	125	85	70	-	220	130	100	70	55	35		11	22	30		45	85	—
МА8	240	180	150	130	ПО	70	-	150	100	70	60	50			15	26	30	32	34	62	—
МАИ	280	•–	–	210	180	140	100	145	–	–	ПО	90	80	60	10			13	15	19	45
МАИ	330	260	210	150	105	70		255	-	–					10	М	28	50	58	62	

Продолжение табл. 3.42

Сплав, состояние	МПа,, при *t*, °C							Оtl 9. МПа, при *t*, °C							6, %, при t. -C						
	20	100	150	200	250	300	350	20	100	150	200	250	300	350	20	100	150	200	250	300	350
ВМД1*	300	—	—	170	150	130	ПО	250		—	—	130	105	90	5	—		12	12	13	20
мдз	180	160	145	105	—	60	—	55	50	45	40	—	30	—	8	10	11	12		11	
МЛ4Т4	250	240	210	150	75	—	—	85	80	75	68	—	—	—	9	7	15	25	26		
МЛ5Т4	250	230	**185**	155	120	90	—	90	80	60	50	40	—	—	9	10	12	15	15		
МЛ6Т6	260	230	210	150	110	80	—	140	—	85	—	70	—	—	1,5	5	8	15	—.	—	
МЛ9Т6	250			210	170	120		145			135	120	105	60	6			5	10	20	25
МЛ10Т6	240			190	165	135		150			140	130	ПО	2	5			8	13	17	
МЛИТ6	160			140	130	**105**	75	100			80	75	60	45	3			6	8,5	30	30
МЛ12Т6	250		160	125	85	55	—	150		100	75	50	30	—	6	—	8	10	12	15	
МЛ15Т1	220	—	150	125	100	75	—	140		105	85	65	50	—	3,5	—	5	13	**16**	**16**	
ВМЛ1Т6"	200	—	—	—	—	145	ПО	95	—	—	—	—	75	55	6	–	—	–	—	10	20

* при температуре 400 =. 70 МПа; 6 = 24%.
" При температуре 400 о^ = 65 МПа; = 35 МПа; г = 25 %.

Таблица 3.41. Прочность и пластичность жаропрочных сталей и сплавов при высоких температурах [3,24]

Сталь, сплав	с. МПа, при *t*, С								в. %, при *t*. °С						
	20	500	600	700	800	900	1000	1100	20	500	600	700	800	900	1000
Стали															
45Х14Н1УВ2М	720	630	540	340	220				20	18	20	32	40		
40Х12Н8Г8МФБ	900	680	630	460	390		—	—	18	11	10	9	9	8	
10Х12Н22Т3МР	1000	900	850	700	470	—	—	—	9	9	10	10	17	—	—
10ХН35ВТЮ	1300	1200	1110	1000	700	400«	—	—	15	12	12	9	15	22*1	—
40Х12Н8Г8МФЛ	800	550	500	370	280				19	32	32	29	20		
15Х12Н25Т3М3В4Л	900		800		500	—	—	—	12	—	5	—	5	—	—
Никелевые сплавы:															
ХН78Т	780			400	180	ПО	65	45	40	—	—	35	70	90	100
ХН60В*2	800			530	400	230	140	85	—	—	—	—			
ХН77ТЮР	1000		950	840	560	400*1			24	—	24	22	15	18*1	
ХН70ВМТЮ	1150		1000	900	740	500	—	—	20	—	17	10	9	15	
ХН55ВМТФКЮ	1200		950	850	650		300	—	12	—	10	10	10	17	20
ХН62МВТЮ	1250		980	980	930	620	300	—	18	—	18	10	8	12	17
ВЛ7-45У	500	—	—	400	300	—	—	—	7	—	—.	**5,5**	10	.—.	—
ЖС3	750	—	—	—.	560	300	—	—	8,5	—	—	—	3	4	—
ЖС6	1050	—	—	—	850	780	480	—	1	—	—	—	0,5	2,5	6
ЖС6К	1000	—	—	—	920	780	530	—	2,5	—	—	—	2	2	4,5
ЭП23	1250	—	—	—	—	940	720	450	2	—	—	—	—	6	13
Кобальтовые сплавы:															
ЛК4	700	—	520	470	400	270	—	—	8	—	12	10	6,5	9	—
ЛК4Я	900		750	700	510	350	260*3	—	5,5	—	11	12,5	14	18	25*®
4К66Я	900	—		750	550	375	295*3	—	6	—	—	10,5	16	25	19*3

При температуре 850 °С.
, „1200 _ 43 МПа.
' При температуре 950 °С.

Таблица 3.42. Прочность при высоких температурах сплавов на основе тугоплавких металлов, керамики и композиционных материалов иа никелевой матрице [3,14,24]

Материал	Ojj, МПа, при *t*. ^C										
		1000	1100	1200	1400 1	1500	1800	1900	2000	220в j	2400
				Ниобиевые сплавы							
ВН2	650	400	300	—	—	80				—	—
ВН3	780		450	270		125					
ВН4	810		700	550		170	—	—	—	—	—
РН6	890	—	—	290	—	–	90	–	—	—	–

Продолокение табл. 3.42

Материал	Ojj, МПа, при *t*,										
	20	1000	1100	1200	1400	1500	1800	1900	2000	2200	2400
Молибденовые сплавы											
ВМ1						140	100	—	—	—	
ВМ2						160	90		80		
МР-47ВП						150	60				
ЦМВ-30						160	63	–	–	–	–
Вольфрамовые сплавы (пс оошковые)											
Вольфрам									80	60	30*«
							140*1	45	–	35	13
							260*1	190	–	90	
W-2Th02							200*1	180		120	70
W—30Re, литой							210*1	140	—		
Хромовые сплавы											
ВХ2						165*2					
ВХ4			210			100*2					
Композиционные материалы											
Никель-2,5НЮ2		150	105	85							
Никель—50 углеродного волокна		240									
ЖСК6—50 вольфрамовой проволоки		540	380	–	290*3						
Керамика (0^ — при изгибе)											
ЗОСГ-7ОА12О3	390	230	—		175*3	—	—	—			
Из оксида Al2O3	150	95		76	60	36					
Твердый сплав	1500										

« При температуре 1650 °С.

Таблица 3.43. Длительная прочность и ползучесть сталей и титановых [3,10,24]

Сталь, сплав	, МПа, при *t*, °С							°0,2/100 МПа, при *t*, °С					
	300	350	400	450	500	550	600	300	350	400	470	500	550
Сплали													
ЗОХМ												242*2	59*2
30Х2Н2ВФА	980	—	800	750	540	320							
ЗОХГСА	–	—.	600*1	460*1	260*1	120*1	—	–	–	640	440	370	240
08Х15Н9Ю	1050		850							160*1	110*1	55*1	22*1
08Х17Н5М3				950	650	400							
10Х12Н2ВМФ				730		440	270				580		200
23Х13НВМФА	—		1400	1000	700					870	620	210	
13Х14НВФРА	950	—·	—	720		300		760			380		180
10Х13Н3ВФЛ	—	—	—	—	450	300	220		—	460	310	215	180
Титановые сплавы													
ВТ5-1	—	450	—	—				400	330			—	—
0Т4	—	480	390						300	190	50		
ВТ6С	—	500	—		140				320				
ВТ6	—	—	580		380					360	140	60	
Вт3-1	—·	—	650	550	360					300	160	50	
ВТ8	—	—	750	650	450	380				370	230	120	
ВТ9	—·	—	—·	—	650	450	230	—				280	120
ВТ14	—	—	680	540	—	—		—	530	350			
ВТ5Л	400		350							280		170	
ВТ6Л			530		470								
ВТ9Л	650		620		500	350		500		460		280	200
ВТ20Л	—	600	—	—	430		—		450		—	160	
ВТ21Л	—	—	600	—	440	–	—	–	–	430	–	180	—

Таблица 3.44. Длительная прочность и ползучесть алюминиевых деформируемых сплавов [3,5,24]

Сплав, состояние, полуфабрикат	с,... МПа, при *t*, °С						°0.2/100, '«Па, при *t*.					
	125	150	175	200	250	300	125	150	175	200	250	300
Д16Т, Д16Т1, ЛИСТ	340	300	230	180		-	180	180	120	85	-	-
Д16чТ, 1163Т, плита	345	315	270				300	270	235			
Д16чТ, 1163Т, прессованный профиль	340	320	270	210				260	210			
ВД17Т1, прессованная полоса				190	100	55				160	75	35
АК4-1Т1, лист	280	250	210	170			250	220	145	90		
АКА-1Т1, плита	350	330	240				280	250	160			
1201Т1, поковка, прессованный профиль, плита	290	250	220	180			240	200	140	130		
Д20Т2, прессованная полоса		300	210	180	125	80		200	170	120	80	65
Л21Т1, лист	370	330	240	170			2^0	250	170	105		
Д21Т1, плита	370	330	260	200	17о		310	280	220	160	95	
В95Т1, лист		230		100								

Таблица 3.45. Длительная прочность жаропрочных сталей и сплавов [3,24]

Сталь, сплав	аюц, МПа, при *t*					
	600	700	800	900	950	1000
45Х14Н14В2М	300	180	80	—	—	
38Х12Н8Г8МФБ	450	250	150			
10Х12Н20Т3Р	580	390	280*			
10Х14Н35М3ТЮ	700	450	250			
15Х10Н22ВМТЛ		400	200			
30Х12Н10Г8ВФЛ	400	280	140	–	–	
Никелевые сплавы						
ХН77ТЮ	580	400	150			
ХН35ВТЮ	670	390	230			
ХН77ТЮР	680	420	200			
ХН70ВМТЮ		500	290	190**		
ХН55ВМТФКЮ		700	440	200		
ХН62Л1ВКЮ		750	450	200	120	
ХН78Т		105	45	15		
ХН75МБТЮ		165	80	29		
ЖС3			300	100		
ЖС6	–	–	500	280		
ЖС6К	–	-	520	320	–	
Кобальтовые сплавы						
ЛК4	300	250	150	70	50	
ЛК4Я		300	180	140	ПО	—
4К66Я	–	–	250	150	120	~

Таблица 3.46. Длительная прочность сплавов на основе тугоплавких металлов и композиционных материалов на никелевой матрице [3,14,24]

Материал	ojoo. МПа, при *t*. °С				
	1100	1200	1300	1400	1500
Ниобиевые сплавы					
ВН2	90				
ВН3	160	—			
ВН4	280				
ВН5А	140				
РН6		110			
ЛШ1	250	110	–		
МН2	360	260	–	–	
Молибденовые спл					
ЦМ2А	—	90	65	40	
ВМ1		90			
ВМ2	–	155	—	50	—
ЦМ6	–	130	40	–	–
ЦМВ-30	-	250		–	5*
Хромовые сплавы					
ВХ1, ВХ2	–	45**	—	–	—
ВХ3	-	150**	–	–	–
Вольфрамовые сплавы					
Вольфрам технический	—	—	—	70	60
Композиционные материалы					
ЖС6—50% вольфрамовой проволоки	150	80	–	—	
Никель —2,5% ThO_2	105	80	–	–	
Никель — 2,5% НЮ^	70	50	–	–	

температуре 1800 °С.

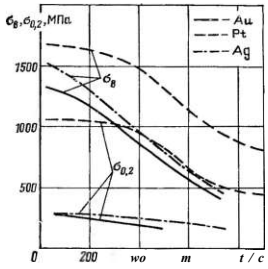


Рис. 3.8. Пределы прочности и текучести золота, платины и серебра при высоких температурах [3, 6, 8]

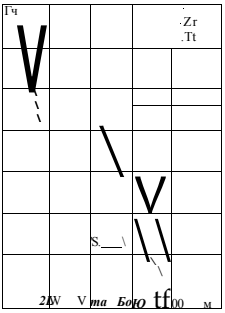


Рис. 3.10. Механические свойства сверхчистых циркония II титана при высоких температурах [6]

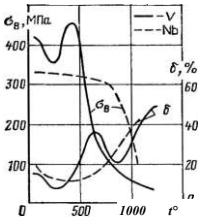


Рис. 3.12. Механические свойства ванадия и ниобия при высоких температурах f3, 6]

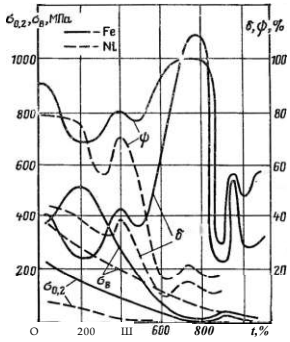


Рис. 3.9. Механические свойства железа и никеля при высоких температурах [6, 10]

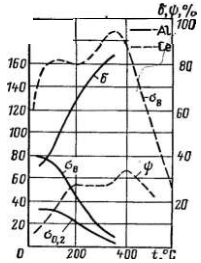


Рис. 3.11. Механические свойства алюминия и церия при высоких температурах [4. 6, 18]

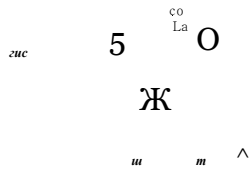


Рис. 3.13. Механические свойства лантана и кобальта при высоких температурах [3, 6]

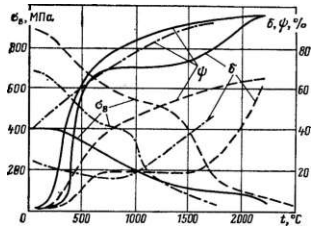


Рис. 3.14. Механические свойства вольфрама и молибдена при высоких температурах [3, 6]:
вольфрам после отжига; вольфрам иагартованый; . — . _ молибден после отжига

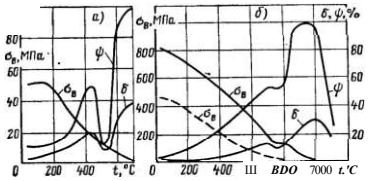


Рис. 3.15. Механические свойства стронция, урана и бериллия при высоких температурах [6]:
с – стронций литой; б – уран; бериллий

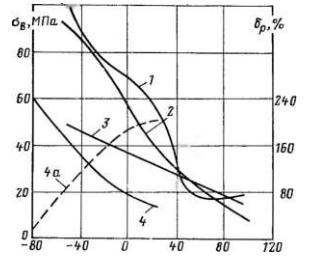


Рис. 3.16. Зависимость прочности некоторых неметаллических материалов от температуры испытания [24]:
/ – капрон (при изгибе); 2 – ПТХЭ (фторопласт-3) при изгибе; 3 – полиэтилен; 4 – морозостойкая резина; – удлинение при разрыве морозостойкой рсзыпы

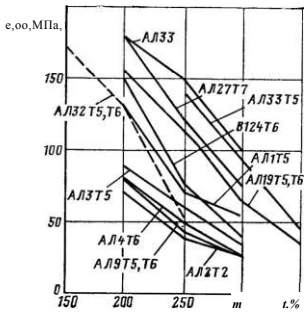


Рис. 3.17 Пределы длительной прочности алюминиевых литейных сплавов [3, 5]

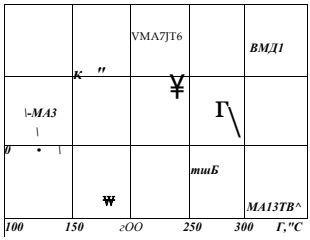


Рис. 3.18. Пределы длительной прочности ( ) и ползучести ( ) магниевых деформируемых сплавов [3]

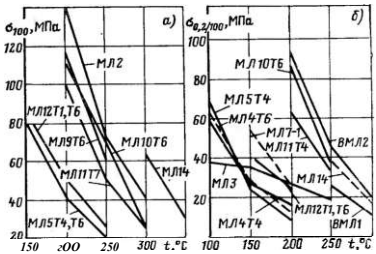


Рис. 3.19. Пределы длительной прочности *(а)* и ползучести (б) магниевых литейных сплавов [3]

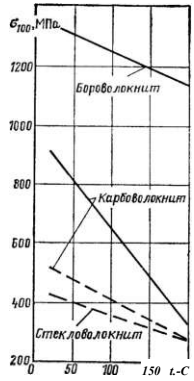


Рис. 3.20. Пределы длительной прочности композиционных материалов на полимерной матрице [13] при растяжении ( ) и изгибе ( )

I ХТU



Рис. 3.21. Пределы ползучести жаропрочных сталей никелевых сплавов [3]

3.4. ВЫНОСЛИВОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Методы определения характеристик выносливости при многоцикловой и малоцикловой усталости регламентируются в ГОСТ 25.502—79. Малоцикловая усталость характеризуется базой испытаний циклов и пониженной частотой нагружения /=0,14-5 Гц, а многоцикловая усталость — ***f = 2 0 — 5 0*** Гц. Повреждение или разрушение в многоцикловой области происходит в основном при упругом, а в малоцикловой — при упругопластическом деформировании.

Таблица 3.47. Пределы выносливости сталей при знакопеременном изгибе

Сталь, сплав	"в' •'^Па	МПа	с- . МПа {K 2-2)
Стали, N = 10' ***циклов*** [3, 20, 24]			
20	400	210	—
35	600	330	
45	950	530	280
ЗОХМА	950	420	260
ЗОХМА	1600	620	
ЗОХГСА	900	480	220
20Х3МВФ	920	530	200
12Х2НВФА	960	520	310
38ХА	1050	500	330
ЗОХЗВА	1050	610	350
30Х2Н2ВФА	1180	560	360
37ХН3А	1250	560	310
40ХН2МА	1300	580	
40ХН2МА	1600	660	370
23Х2НВФА	1350	645	380
25Х2ГНТА	1500	610	360
25Х2ГНТА	1600	700	440
ЗОХГСНА	1650	700	490
ЗОХГСНА	1750	730	
40ХН2СМА	1800	700	
40ХН2СМА	2000	830	550
12Х18Н9Т	580	285	245
20Х13	950	480	240
09Х15Н8Ю	1350	620	–
13Х12Н2ВМФА	1200	600	400
23Х13НВМФА	1600	600	450
12Х13НЗВФЛ	900	420	280
10Х17НЗСЛ	1000	410	260
Титановые сплавы [3,10,24], N=^2-10 ' циклов			
ВТ1-0, лист	415		—
ВТ1-1,	450	230	–
0Т4-1, »	650	340	–
0Т4, »	750	380	–
ВТ5-1, 0Т4, лист	750	400	–
ВТ5, пруток	850	450	310
ВТ6С, лист	950	500*	420*
ВТ6, пруток	1100	550*	300*
ВТ20, лист	950	420	–
ВТ14, »	900	400	–
ВТ14, »	1200	420	—
ВТЗ-1, пруток	1000	480	–
ВТЗ-1, »	1100	560*	390*
ВТЗ-1, »	1200	620*	–
ВТ22, »	1100	530	330
ВТ8, »	1050	500	–
ВТ9, »	1150	540	–
ВТ5Л	800	280	250
ВТ14Л	950	270	230
ВТ6Л	850	200	–
ВТ9Л	1000	180	180
ВТЗ-1 Л	1000	220	220

База испытаний *JV* = 10' циклов.

Таблица 3.48. Пределы выносливости алюминиевых сплавов при знакопеременном изгибе на базе 2 • 10' циклов [3, 5, 20]

Сплав, состояние, полуфабрикат	МПа	м ш	о" J, МПа (K^ = 2,2)
АДШ, ЛИСТ	80	35*	
АДШ, »	150	50	
АМг3М, »	230	80	
АМг5М, »	300	110	
АМгбМ, лист, прессованный профиль	340	100	- -
АД31Т1, прессованный профиль	250	90	50
АД33Т1, то же	320	ПО	60
АД35Т1, »	330	ПО	
АВТ1, »	350	115	65
Д1Т, Д1чТ, штамповка	410	140	—
Д16чТ, плита, профиль	440	140	80
Д16чТ1, лист	470	120	–
Д16чТ1, прессованная панель	480	140	–
Д19Т, Д19чТ, прессованный профиль	480	160	–
ВАД1Т, лист	440	120	—
Д20Т1, лист, прессованный профиль	420	130	70
Д21Т1, поковка, штамповка	430	ПО	—
АК4-1Т1, плита, прессованный профиль	420	120	80
АК6Т1, штамповка	420	130	80
АК8Т1, прессованный профиль	**480**	135	85
ВД17Т1, прессованная полоса	**520**	155	90
В92Т1, прессованный пруток	450	150	–
В95пчТ1, лист, плита	570	160	90
В95пчТ1, прессованная панель	**600**	180	–
В95пчТ2, лист, плита, поковка, прессованная панель	**540**	160	–
В95пчТ3, прессованная панель	**500**	**160**	—
В95пчТ3, поковка	510	140	–
ВЭ3пчТ!, поковка	520	140	80
В93ПЧТ2, »	470	140	–
В93пчТ3, »	440	130	–
В96Ц3Т1, штамповка	630	170	–
САП1, прессованная полоса	300	80	60
САП2, прессованный профиль	350	90	60
САП3, прессованный пруток	400	115	75
САС1-400	270	80	—
С АС 1-50	340	90	–
АЛ1Т5	260	56*	–
АЛ4Т6	260	70	–
АЛ4МТ5	350	90**	–
АЛ5Т5	260	65*	–
АЛ8Т4	300	50*	
АЛ9Т5	210	45*	–
АЛ9-1ТБ***	270	80	–
АЛ19Т5	360	70	–
АЛ19Т5***	400	90	–
АЛ20Т2, АЛ21Т2	210	70	–
АЛ20Т7, АЛ21Т7	240	75	–
АЛ23-1Т4	230	40	–
АЛ27Т4	360	60	–
АЛ27-1	390	80	50
АЛ27-1Т4	380	70	—•
АЛ33Т5	280	75	— -
ВАЛ8Т5***	400	ПО	–

* База испытаний N = 5- 10- циклов.
** База испытаний W = 10' циклов.
••• Литье в кокиль, остальные — и .чемлю.

Характеристики выносливости зависят от формы и размеров образца, а также способа и частоты нагружения. С понижением частоты нагружения и увеличением абсолютных размеров образца сопротивление усталости падает. Выносливость металлических материалов существенно зависит от состояния поверхности и определяется, как правило, на полированных образцах; пластмассы менее чувствительны к чистоте поверхности.

Большая часть данных по многоцикловой усталости получена при испытаниях на изгиб симметричным циклом с определением a_,. Для ориентировочной оценки пределов выносливости при других видах напряженного состояния можно использовать следующие соотношения: для конструкционных сталей предел выносливости при растяжении — сжатии oBj = (0,8-b0,9)a_i, при кручении т_,= (О,5-нО,6)0-,; для алюминиевых сплавов эти коэффициенты составляют 0,85—0,95 и 0,55—0,65 соответственно.

Для некоторых групп материалов установлены зависимости между пределами выносливости и прочности. Отношение О-I/ОВ ДЛЯ сталей составляет 0,35—0,55 при базе испытания 2-10^ циклов, для титановых сплавов 0,45—0,55 при W=2-10' циклов; при этом более высокопрочным материалам отвечают меньшие значения О-i/Ob. Для неметаллических материалов (текстолиты, органические стекла и др.) a_,= (0,2-^0,3)Ов { N ^ W циклов).

Таблица 3.49. Пределы выносливости магниевых сплавов при знакопеременном изгибе на базе 2 • 10' циклов [3]

Сплав, состояние, полуфабрикат	Од, МПа	о_1, МПа	о" ,, МПа (К, = 2,2)
МА2-1, плита	270	105*	70*
МАЗ, полоса	280	115	.—
Л\А5Т4, пруток	320	130	100
МА14-Т1, полоса	340	120	80
МА10Т6, пруток	430	125	**80**
МАПТ6, »	280	85	**50**
МА13Т8, лист	240	70	–
ВМД1, пруток	280	70	50
МАЬМ, »	240	75	–
МА2, »	270	100*	—
МА8, полоса	260	80	–
МЛ4	170	80	65
МЛ4Т4	235	90	80
МЛ4Т6	240	80	70
МЛ5, МЛ6	150	85	70
МЛ5Т4	240	100	80
МЛ5Т6. МЛ6Т6	240	85	70
Л\Л6Т4	235	95	75
МЛ 12	210	50	50
МЛ12Т1	230	75	70
МЛ12Т6	250	80	–
МЛ15Т1	215	90	70
МЛ9Т6	240	80	—
МЛ **ЮТЕ**	240	**70**	–
МЛПТ4, Т6	155	70	—
МЛ14	200	50	—
ВМЛ2	260	60	
МЛЗ, МЛ7-1	180	55	

База испытаний Л = 5 • 10'.

Таблица 3.50. Влияние температуры иа пределы выносливости жаропрочных сталей и никелевых сплавов при знакопеременном изгибе на базе 2-10' циклов [3]

Сплаг	МПа	МПа, при t, С					МПа, при t. °С			
		20	600	700	800	900	600	1 1 тм	£00	ссо
10Х12Н20Т3Р	900		330	280						
10Х13Н35М3ТЮ	1000			300	260					
08Х35ВТ10	1150			300*	230					
ХН77ТЮ	1000	360	390	360	300					
ХН77ТЮР	1000	370	360	390	300		240	250	230	
ХН55ВМТФКЮ	1100			350	360	300		270	270	270
ХН62МВКЮ	1180			300	305	300		255	255	255
ХН70ВМТЮ	1150		350	370	365	250	–	290	270	ISO
ЖСЗ	750			–	300	–	–	–		
ЖС6"	1040	270		–	270	260	–	–		—
ЖС6К**	1000	280		–	280	290	–	–	–	–
ВЛ7-45У	500	260	–	–	160	–	–	-	-	

- При температуре 750 °С,
при 1000 °С = 220 МПа-

Композиционные волокнистые материалы отличаются повышенным отношением a_i/aB=0,6-4-0,8 (iV=10' циклов).

В табл. 3.47—3.53 и на рис. 3.22—3.24 представлены следующие характеристики выносливости:

о_, —предел выносливости при симметричном изгибе — наибольшее напряжение цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого числа циклов или при заданной базе испытаний 10^ циклов);

о"—предел выносливости образца с надрезом или отверстием при /С(=2,2-^2,6, где — теоретический коэффициент концентрации напряжений;

Отах-предел выносливости (малоцикловой усталости) при асимметричном растяжении гладкого (/С(=1) или надрезанного (/С(=2,2^2,6) образца — наибольшее напряжение цикла, при котором не происходит разрушения при заданной базе испытания;

N — долговечность — число циклов, выдерживаемых образцом перед разрушением при заданном база испытаний.

Таблица 3.51. Значения пределов выносливости композиционных материалов и пластмасс при знакопеременном изгибе на базе 10' циклов [3,12,14,24]

Материал	м ш	Мп'а	Материал	'в- МПа	МПа
Бороалюминий	1250	650	Бороволокнит	1300	420
	1150	600	Карбоволокнит	1020	500
	1100	550		**650**	300
Боромагнии	1200	550			
Углеалюминш	1200	400	Стекловолокнит	350	90
	650	170	Оргстекло	62,5	17-30

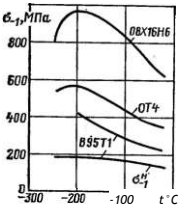


Рис. 3.22. Влияние низких температур на предел выносливости (база 10" циклов) некоторых сплавов [3]

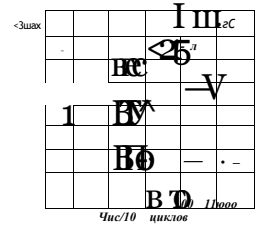
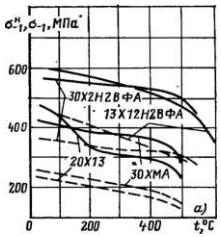
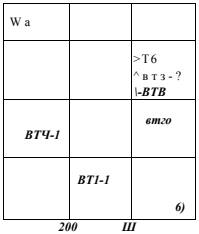


Рис. 3.23. Кривые малоцикловой усталости титановых сплавов [10] при температуре 20 ( ) и Шб^С ( )





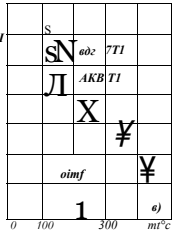


Таблица 3.52. Малоцикловая усталость при асимметричном растижении* [3,5,10,20,24,27,30,31]

полуфабрикат	МПа		База испытаний N, 10® циклов	"max- МПа
ЗОХГСА, пруток	1000	1	50	650
То же	1000	1	20	800
	1000	2,6	20	400
ЗОХГСНА, пруток	1600	2,6	100	400
То же	1750	1	50	900
	1750	1,6	50	650
	1750	2,2	50	500
	1750	4	50	250
03Х18К8Ai5Т, поковка	1700	2,6	100	450
ВТ1-0, лист	400	2,6	20	300
ВТ5-1, »	800	2,6	20	600
ВТ6С, »	980	2,6	20	750
ВТ22, поковка	1100	2,6	100	350
ВТ23. плита	1100	2,6	100	330
ВТ5, пруток	950	2,2	20	630
Д16Т, лист	480	1	50	280
То же	480	1	20	400
	480	2,5	20	280
	480	2,6	20	250
	480	2,6	50	180
Д16Т1, лист	480	2,6	50	160
Д19Т, »	470	2,6	50	180
В95Т1, »	500	1	20	320
То же	500	2.5	20	260
В95пчТ2, дист, плита	530	2,6	50	160
Д16чТ, плита	470	2,6	50	200
То же	470	2,6	100	190
АК4-1Т2, плита	430	2,6	50	185
1201Т1, »	465	2,6	50	180
В93ПЧТ1, Т2, Т3, штамповка	420-500	2,6	50	150
В95очТ2, поковка	540	2,6	50	190
Д16Т, пруток	480	2,2	20	430
В95Т1, »	650	2,2	20	400
В95ПЧТ1, Т2, Т3, панель	480—565	2,6	50	180
Д16чТ, прессованный полуфабрикат	440	2,6	20	250
В95Т1, то же	600	2,6	20	200
ВАЛ8Т5, отлпвка	400	1	50	200
То же	400	2,2	50	180
Бороалюминий, лист	1250	1	800	950
Боромагний, »	1200	1	800	800

* « = ='min/"max =

Рис. 3.24. Влияние высоких температур на предел выносливости сталей (а) [3, 31], титановых сплавов *(б)* [3, 10, 24], алюминиевых сплавов {в)[31, 5, 3]: <i_i; о-У

Таблица 3.53. Влияние температуры испытания на сопротивление малоцикловой усталости полосы с отверстием *(Kt = 2,5)* при асимметричном растяжении* [3,20]

Сплав, состояние, полуфабрикат	МПа	База испытаний N, 10® циклов	t, °С	°тах> МПа
Д16Т, лист	470	20	20	260
			200	220
В95Т1, »	550	20	20	220
			200	180
АК4-1Т1, плита	430	50	20	190
			150	170
ВТ1-1, пруток	700	20	20	390
			300	210

^ = °min/'max

3.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Основными характеристиками разрушении являются вязкость разрушения или критический коэффициент интенсивности напряжений и скорость роста трещины усталости. Характеристики разрушения при однократном нагружении определяют на образцах с заранее выращенными усталостными трещинами. Коэффициент интенсивности напряжений К характеризует концентрацию напряжений в вершине трещины; в общем виде ***К=аУп1 у,*** где а—напряжение в сечении брутто; l — половина длины трещины; *у* — функция, зависящая от геометрии образца и трещины Критический коэффициент интенсивности напряжений определяют по моменту, при котором наступает нестабильный рост трещины.

Вязкость разрушения при плоской деформации *Kic* оценивают по результатам испытания внецентренным растяжением компактных образцов, толщина которых ***i=2,5 (KiclOo,2y*** обеспечивает наиболее стесненные условия для пластической деформации перед фронтом трещины.

Таблица 3.54. Вязкость разрушения при плоской деформации

Материал, состояние, полуфабрикат	Направление вырезки образца*	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_C, МПа·м$^{1/2}$
Стали [25—27]			
20, нормализация	ДП	400	140
15Х2НМФА, нормализация	ДП	640	148
40Х, закалка и отпуск	ДП	1250	115
40ХНМ, то же	ДП	1500	
30ХГСНА, изотермическая закалка	ДП	1550	
03Н18К8М5Т, закалка и старение	ДП	1550	
03Н18К9М5Т. то же	ДП	1700	100
То же	ДП	1800	75
	ДП	2000	70
Титановые сплавы [21,26,S!8]			
0Т4, отжиг, штамповка	ДП	700	
ВТ5-1, отжиг, пруток	ДП	750	
ВТ20, отжиг, поковка	ДП	760	
ВТбч, отжиг, плита	ДП	820	
ВТ3-1, отжиг, поковка	ДП	950	
ВТ3-1. закалка и старение, штамповка	п д	1200	
ВТ9, то же	ДП	1050	
То же	ДП	1150	
ВТ22, отжиг, штамповка	ДП	1080	
ВТ22, отжиг, плнта	ДП	1050	
ВТ22, закалка и старение. пруток	ДП	1250	
ВТ23, старение, плита	ПД	1080	
ВТ9Л, закалка и старение	–	1000	
ВТ20Л, отжиг		800	
Алюминиевые сплавы [5,20,22,28]			
Д16Т, поковка	ПД	290	
» , плнта	ПД	340	
» , прессованная полоса	ДП	340	
Д16чТ, поковка	ДП	290	
Д16Т1, прессованная полоса	ДП	345	
Д16чТ1, поковка	ПД	375	
Д16чТ1, штамповка	ДП	465	
Д16чТ1, плита	ДП	400	
Тоже	ДП	450	
»	ПД	460	
Д16очТ1, плита	ПД	430	
1201Т1 »		350	
Тоже		345	
		350	
АК4-1Т1, »		330	
Тоже	ДП	400	
	ПД	360	
АК4-1Т1, штамповка	ДП	400	
АК6П, поковка	ДП	320	
АК8Т1, поковка, штамповка	ДП	420	
В95Т1, плита	ДП	485	
Тоже	ПД	475	
В95очТ1, плита	ПД	490	
В95ПЧТ2, »	ДП	460	
	ПД	455	

Продолжение табл. 3.55

Материал, состояние, полуфабрикат	Направ- вырезки образца*		
В95пчТ3, плита	ДП	440	37
	ПД	435	30
В93пчТ1, штамповка	ДП	480	29
В93ПЧТ2,	ДП	440	33
В93ПЧТ3,	ДП	360	35
В96Ц3Т3, »	ДП	460	30
В96ЦТ1, »	ДП	560	22
Композиционные материалы однонаправленной структуры на полимерной матрице [12]			
Эпоксиуглеволокнит	ДП	1050	2,45
Эпоксибороволокнит	ДП	1200	2,7
Эпоксистекловолокнит	ДП	1800	2,9

Таблица 3.55. Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии алюминиевых я титановых сплавов*

Сплав, состояние, полуфабрикат	$\sigma_{0,2}$, МПа	B, м	K^{y}_{C}, МПа·м$^{1/2}$
Алюминиевые сплавы [5,20,22,28]'			
АМгбН, лист холоднокатаный	355	0,1	
Д16Т, то же	330	0,1	
То же	330	0,4	
Д16Т, лист горячекатаный	350	0,1	
То же	370	0,4	
Д16Т1, лист холоднокатаный	420	0,1	
Д16чТ, то же	300	0,2	
ДШчТ, лист горячекатаный	300	0,2	
То же		0,7	
Д16чТ, плита	350	0,2	
ДШчТ, панель прессованная	420	0,2	
АК4-1Т1, плита		0,2	
То же		0,7	
1201Т1, лист холоднокатаный		0,2	
1201Т1, лист горячекатаный			
То же	330	0,3	
	330	0,4	
1201Т1, плита	365	0,2	
В95Т1, лист горячекатаный	480	0,1	
То же	540	0,1	
В95ОТТ1, лист горячекаталный	530	0,1	
В95пчТ2, лист холоднокатаный ,	475	0.2	
В95пчТ2, АИСТ горячекаталный	460	0,2	
То же		0,1	

• Образцы ДП.

Продолжеше табл. 3.55

Сплав, состояние, полуфабрикат	^0,2- «n"»	*В,* м	*кУ.*
В95пчТ2, лист горячекатаный	480	0,2	80
В95пчТ2, плита	465	0,2	80
В95пчТ2, панель прессованная	480	0,2	85
Титановые сплавы [21,27,28]			
0Т4, лист, отжиг	660	0,1	140
ВТ5-1, тоже	800	0,1	100
ВТ14, лист, отжиг	950	0,1	88
ВТ14, лист, закалка и старение	1175	0,1	62
ВТ20, лист, отжиг	950	0,1	115
ВТ6, лист, закалка и старение	1050	0,1	71—85

Таблица 3.56. Влияние низких температур на вязкость разрушеняя при плоской деформации некоторых сталей и сплавов [22, 25—27)

Сталь, сплав	МПа	*Kic,* МПа-м1/2, при *t,*°С			
		20	-70	-130	–196
Сталь 20	285			47	22
25Г2НМ	350	175	50	40	
15Х2НМФА	640	148	83	68	
ЗОХГСНА	1550	85	45		
03Х18К8Н5Т	1550	130	130	120	
03Х18К9М5Т	1700	100	79	63	47
03Х18К9М5Т	2000	70	70		
ВТбч, плита	820	85			60
Д16Т, прессованная полоса	340	37	–		55
Д16Т1, то же	350	31			35,5
1201Т1, плита*	350	35			35
АК4-1Т1. »	330	31			36
АК4-1Т1, »	405	27			30
В95Т1, »	495	28	–	–	29

' При температуре –253 °С Kic =40 МПа м'/3.

Таблица 3.57. Скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах [5,20,27,27]*

Сплав, состояние, полуфабрикат	"0,2' МПа	*dl/dNW,* м/цикл, при А/(, МПа-м1/2			
		12,4	15,5	18,6	21,7
Д16Т, лист	325	0,37	0,6	1,0	
Д16чТ, »	350	0,2	0,35	0,5	0,9
Д16Т1, »	470	0,35	0,55	1,0	1,7
Д16чТ1, »	480	0,35	0,5	0,9	1,5
Д19Т, »	345	0,3	0,5	0,65	1,3
Д19Т1, »	450	0,35	0,75	1,7	3

Образец — пластина шириной 100—200 мм
тыпание при асеимегричном растяжении.

Продолжение табл. 3.S7

Сплав, состояние, полуфабрикат	"0,2- МПа	*dl/dN-W,* м/цикл, при А/С, МПа.м1/2			
		12,4	15,5	18,6	21,7
1911Т1, лист	355	0,4	0,8	1,5	2
В95Т1, »	500	0,5	0,8	1,3	1,6
В95ПЧТ1, »	530	0,3	0,65	1,0	1,2
В95пчТ2, »	480	0,4	0,7	0,9	
АМг6М, »	170	1,5	2,5		
АК4-1Т1, плита	450	0,4	0,75	1,5	2,2
1201Т1, »	345	0,3	0,5	1,1	1,4
В95ПЧТ1, »	500	0,65	1,25	1,95	
В95ПЧТ2, »	460	0,5	0,8	1,15	
Д16чТ, »	350	0,2	0,4	0,75	
Д16чТ1, »	470		0,6	—	
Д16чТ, штамповка	325	0,3		0,7	
АК6Т1	350	0,4		0,85	
В93ПЧТ2, Т3 »	360—440	**0,25**	–	**0,55**	
Д16чТ, прессованная панель	400	0,2	0,4	0,45	0,6
Д19Т, то же	345	0,25	0,45	0,75	1,3
В95Т1, прессованная полоса	560	0,5	0,8	1,0	1,3
В95пчТ1, прессованная панель	560	0,4	0,65	1,05	
В95пчТ2, то же	470	0,3	0,5	0,95	
В95ПЧТ3, »	430	0,25	0,4	0,9	–

Таблица 3.58. Скорость роста трещины усталости в титановых сплавах и сталях [21,26,27,28]

Сплав, ста полуфабри		*dlldN. IC.* м/цикл, при *AK.* МПа.м1'2				
		15,5	25,4	31	46.6	54,4
0Т4-1, отжиг, лист	**570**		–	**0,45**	**1,05**	**1,8**
0Т4, то же	**660**			**0,7**	**2**	
ВТ20, »	**950**	-		**0,5**	**1,2**	**М**
ВТ23, закалка и старение, лист	**1150**			**0,7**	**3**	
ВТбч, отжиг, плита*	**850**	**0,16**	**0,5**		**1,9**	**2,6**
ВТбч, закалка и старение, плита*	**1000**	**0,15**	**0,6**	**0,9**	**1**,1	**2,3**
ВТ22, отжиг, плита*	**1100**	**0,15**	**0,4**	**0,9**	**1,8**	
ВТ23, старение, плита*	**1100**	**0,15**	**0,5**	**0,8**	**1,5**	—
ВТ23, закалка и старение, поковка*	**1050**	**0,22**	**0,8**	-	**2**	-
ВТ22, отжиг, штамповка	**1000**	-	-	-	-	**2**
ВТ23, отжиг, плита	**1000**	-	–	–		**2,5**
ЗОХГСНА, изотермическая закалка	**1550**				—	**0,65**
03Н18К8М5Т, закалка и старение	**1550**	-	-	-	-	**0,55**
Ст3	**265**					
18Г	**240**					
09Г2С	**360**	–	**1,3**	–	–	–

Внецентреиное растяжение компактных образцов.

Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии К?; определяется, как правило, при растяжении широких, относительно тонких пластин с центральной щелью (ширина В=100-f-400 мм; <=2-5-15 мм). Длина щели вместе с выращенными по ее концам трещинами составляет примерно 0,3 ***B.*** При определении ***K^*** в расчет принимается начальный размер трещины (вместе со щелью).

Скорость роста трещины усталости определяют на пластинах с центральной щелью размером 2/=6ч-10 мм при циклическом растяжении. Графическое дифференцирование кривой «прирост трещины Д-2/ —число циклов позволяет получить скорость роста трещины усталости ***dl/dN*** в зависимости от размам коэффициента интенсивности напряжений *AK^Aal'^l Уш* где Ла=0тах;-5-Omin —размах напряжений цикла.

Значения характеристик разрушения зависят от уровня прочности и структуры сплава, геометрии образца и трещины, а также условий нагружения. Представленные в табл. 3.54—3.58 данные получены на образцах со сквозной трещиной. Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии К с существенно зависит от геометрии образца, в частности от ширины пластины. Ориентировочно значение величины К с пропорционально *{В* — ширина пластины), однако оно возрастает с увеличением ширины пластины не строго пропорционально YB , а в меньшей степени.

Для некоторых групп материалов установлены корреляционные связи между значениями вязкости разрушения при плоской деформации Kic и удельной работы образца с трещиной КСТ при ударном и статическом изгибе [5, 21].

3.6. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В табл. 3.59—3.62 приведены: временное сопротивление разрыву Овр, предел текучести От, твердость материала по Виккерсу HV, модуль Юнга ***E,*** модуль сдвига *G,* объемный модуль *B,* коэффициент Пуассона ц, температура кристаллизации при отжиге из аморфного состояния Тк. В примечании для некоторых сплавов указаны их общепринятые названия.

Модули упругости аморфных металлов связаны соотношениями

$$E \qquad EC$$

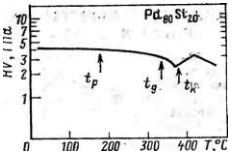
$$3(1—2(x) \qquad 3(30—£•)$$

Данные в таблицах, если не оговорено особо, приведены для температуры 20 ***'C,*** для сравнения указаны механические свойства некоторых металлов в поликристаллическом или жидком состоянии.

Аморфные сплавы (АС) получают сверхскоростной закалкой из расплава со^сКоростью Ю'^—10' К/с. АС можно рассматривать как идеальный упругопластичный материал с исчезающе малым деформационным упрочнением. В зависимости от температуры в АС наблюдаются два типа пластического течения. При температурах ниже ***Tp=0,7-i-0,8 Тк*** имеет место высокая локальная пластичность при макроскопически хрупком характере разрушения. Скольжение происходит в локализованных полосах деформации (гетерогенная деформация). При температурах выше Тр пластическая деформация однородна и осуществляется путем вязкого течения (гомогенная деформация).

Таблица 3.59. Упругие свойства аморфных Оииариых сплавов [33—39,41]

Материал (состав, %)	-BP- ГПа	ГПа	HV. ГПа	£, ГПа	G, ГПа	*B.* rna	р-	Т^. К
%o2Пзо **Mg (поликристаллический)**	–	–		35 45 137	17,5	34	0,28	358,6 –
izk, **FeBS**	–	3,63	10,8 12,89	168 175,5	64,9	141 –	0,3 0,32	–
FeiOO-**xPx**(14<Je<21)	–	–		120—130	–	–	–	–
Fe (поликристаллический)	–		–	211	82,4	–	0,28	–
Fe («усы»)	–	T2	–	–	79,2	–	–	–
C%d5 **Co„Sm2**	– **z**	**Z**	11,3	176,5 120	39 42,6	– 111	0,34	–
NiaoP„-	–	–	–	103	36,7	161	0,394	
No	1,96		5,3	96,7 74,5		Z	**z**	7И
CU5ZrH3	1,96		5,3	74,5	–	–	–	–
CU5oZr„o	–		5,69	85,3	–	–	0,36	–
Cu^Tiso	–		5,98	96,7	–	–	0,36	–
Cu (поликристаллический)	–	–	–	123	45,5	136	0,35	
Pd8o5i2o Pd (поликристаллический)	1,33	0,86	3,19 3^7	66,7 122 91,2	35,5 44,1	182 139	0,416 0,30 0,43	653 –



Piic. 3.25. Температурная зависимость твердости HV аморфного сплава PdeoSiao; fg — температура стеклования, температура, кристаллизации [34]

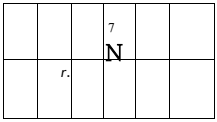


Рис. 3.26. Температурная зависимость предела текуче-; сти аморфной фазы' Pdeo Siao (/) и кристаллической орторомбнческой фазы Pds Si *(2)* [36]

ZOO				*IJ-*
^186				
y^m				
no				-
	200	*200*	*W t.'C*	

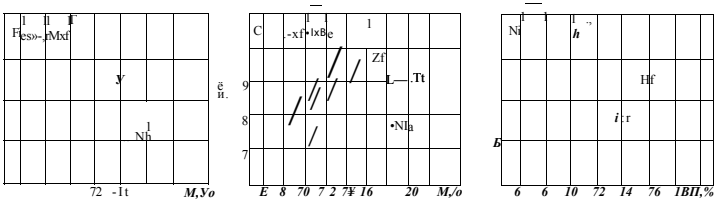
Iff-

S

Рис. 3.27. Температурная зависимость модуля Юцга *E* и коэффициента поглощения ультразвука для аморфного сплава Co7o,4 Fei.e Siig B,o- Измерен||?1 проводились при частоте звука 140 **Гц.** Экспоненциальный рост внутреннего трения (Q"') при приближений к температуре стеклования (здесь — около 500°C) характерен для всех аморфных материалов [333

Таблица 3.60. Упругие свойства аморфных многокомпонентных сплавов [33-42]

Материал (состав, %)					Ë	E	i		
			7,16	105					Metglas 2204
Ti5oBe4,,Zri,,			8,92	125,5				773	Amomet 26
	3,33		7,45	121:, 6	–	–	–	693	
FesoPisC,	3,04		8,19	135,3	–	–•	–	–	Metglas 2615
Fe,,,PuQBi		2,44				–	–	–	
FeeoCr,,Mo«B,«		4,5						–	
Pe4,,Co4oBro				174,2	65,0	184	0,34	–	
				166	61,0	206	0,365	–	
				159,7	59,6	167	0,341	–	Vitrovac 0040
Fe4,,Ni4oB,o^						–	–	–	Metglas 2826
			,3—7,4	126—144		-	–	–	Metglas 2826A
			7,35	144					Metglas 2826B
Fe22Ni3°C?i4Pi,Be			7,77	132	4810	169	0,37		
Fe,9Ni4sPi4BeSi2			8,29					868	
$Fe_{82}Zr_{12}B_6$			7,75		-	-		820	
$Fe_{82}Nb_{12}B_6$			9,95	144				885	
$Fe_{82}Mo_{12}B_{20}$	**2,60**		9,02			**z**	—		
$Fe_{82}Hf_{12}B_6$			8,92	104				763	Amomet 27
$Co_{75}Si_{15}B_{10}$			8.73					833	
$Co_{82}Ti_{12}B_6$				175	66,7	132	0,32	–	
$Co_{74}Fe_6B_{20}$			8,34				–	648	
$Co_{82}Zr_{12}B_6$			**6,77**		—	—	–	705	
$Co_{82}Nb_{12}B_6$			9.17					820	
$Co_{82}Hf_{12}B_6$			7,50					723'	
$Co_{82}Ta_{12}B_6$			8,43	103		–	–	733	Amomet 28
$Ni_{75}Si_8B_{17}$	2,65						–	•–	Vitrovac 0080
$Ni_{78}Si_8B_{14}$	1,85							703	
$Ni_{82}Zr_{12}B_6$			**6,62**					725	
$Ni_{82}Hf_{12}B_8$			**6.18**					653	
$Ni_{85}Ta_{12}B_6$			5.74						
Nie4PdleP20	1,77		5,31	104			0,40	—	
Pd77.5C"eSi,6.5		1,47	4,46	82,5	34,8	182		–	
Pd64NiieP20	1,57		4,43	92,2			0,41	–	
Pd4oNi4oPi,o				98,1				–	
PteoNiisP^s				96,1	33,8	202	0,421	–	



Зависимость твердос'ги HV аморфных сплавов Ре»)4-гМ,Вб, Cos.-v.W.Be и Ni94-^Mx где M=Ti. Zr, Rf. Nb и Та, от массового содержания компонента М |40]

Таблица 3.61. Значения объемных модулей аморфных (Ва) и жидких (iB) металлов, их соотношений со значениями в жидкой фазе н скачка объема при кристаллизации {^VIV) [33]

Материал (состав, %)	в^, ГПа	в/5.	*AV/V, %*
PdscSi^o	182	1,062	1
	182	1,065	1,6
Co^Sni,	133	1,045	1,6
Na (жидкий при	54	1,08	2,5
Cs (жидкий при	1б	1,13	2,6

Таблица 3.62. Значения Модуля Юнга fg и сдвиговых модулей Gg аморфных сплавов и модулей £0 и Gt кристаллизованных сплавов [33J

Материал .(состав, %)	E	ty"	E o"	o"
Pd8,Si9	80	1,26	35,5 –	1,34
C089,5™1Й,5			42,6	1,36
CO.P,			39	1,34
ад»	105	1,23	–	–
F%,B,,,	168	1,24	64,9	1,35
Ni,jP24 (закаленный)	95	1,32	33,5	1,46
™77,5CueSii6 5 (отожженные)	94	1,24	34,8	1,35
SiO^		–	31	1,38

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник. Т. 1, — 2-е изд. М.; Изд-во литературы по черной и цветной металлргин, 1961.

2. МехаНИieCKHe свойства редких металлов/Под ред. Л. Д. Соколова. М.: Металлургия, 1972.

Конструкционные м^^ериалы: В 3-х томах/Под ред. А. Т. Туманова, М.: Советская энциклопедия, 1965.

4. Буркхардт А. Механические и технологические свойства чистых металлов: Пер. с нем./Под ред. Я. П. Селиского. М,—Л.; Металлургиздат. 1941.

5. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник; Под ред. .Ф. И. Квасова, ^И. Н. Фридляндера. — 2-е изд. М.: Металлургия, 1984,

6. Савицкий Е. JW, Бурханов Г. С. Металловедение сплавов тугоплавких и редких металлов. — 2-е изд. М.: Наука, 1971.

7. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов: В 2-х частях:—3-е изд. М.: Машиностроение, 1974.

8. Благородные металлы: Справочник/Под ред. Е. М. Савицкого. М.: Металлургия, 1984.

9: noTaiK Я. М. Высокопрочные стали. Сер. Успехи современного металловедения. М.: Металлургия, 1972.

10. Титановые сплавы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1977.

11. Савицкий Е. М. Влияние температуры на механические свойства металлов и сплавов. М.: Изд-во АН СССР, 1957.

12. Гуняев Г. Л. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов, М.: Химия, 1981.

13. Заболоцкий А. А. Производство и применение композиционных материалов. Итоги науки и техники. Сер, Композиционные материалы. М.: ВИНИТИ АН СССР. 1976.

14. Структура и свойства композиционных материалов/К, И, Портной, С, Е. Салибеков, И, Л. Светлов, В. М. Чубаров. М.:^ Машиностроение, 1979.

15. Современные композиционные материалы: Пер. с англ./Под ред. И. Л. Светлова. М.: Мир, 1970

16. Минералы и горные породы СССР/Т. Б. Здорик, В. В, Матиас, И. Н. Тимофеев, Л. Г. Фельдман. М.: Мысль, 1970.

17. Лебедеве С. И. Определение микротвердостл минералов. М.: Изд-во АН СССР, 1963.

18. Алюминиевые сплавы: Справочник/Пер. с нем. М,: Металлургия, 1979.

19. Кошелев П. Ф. Механические свойства сплавов для криогенной техники. М.: Машиностроение, 1971.

20. Киш«ина С. И. Сопротивление разрушению алюминиевых,'сплавов. М.: Металлургия. 1981.

21. Дроздовский Б. А., Проходцева Л. В., Новосильцева, Н. И. Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983.

22. Кудряшов В. Г., Смоленцев В. И. Вязкость !разрушения' алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1976.

23. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: Справочное пособие: В 3-х томах. Т. 2 /Под ред. С. И. Кишкиной и Н. М. Склярова. М Машиностроение, 1974

24. Справочник металлиста; В 5 томах. Т. 2/Под ред. к. Г. Рахштадта, В. А. Брострема. М.: Машиностроение, 1976.

25. Романив О. Н. Вязкость разрушения коиструк-

ционных сталей. Сер. Достижения отечественного металловедения. М.: Металлургия, 1979.
26. Сопротивление развитию усталостных трещин в металлических сплавах, применяемых в железнодорожном транспорте: Сборник научных трудов/Под ред. Н. А. Буше, М. Н. Георгиева М.: Транспорт, 1984.
27. Циклическая трещиностойкость металлических материалов и элементов конструкций транспортных средств и сооружений: Сборник научных трудов/Под ред. В. Н. Данилова, Н. Я. Межовой. М.: Транспорт, 1984.
28. Микляев П. Г^ Нешпор Г. С., Кудряшов В. Г. Кинетика разрушения. М.: Металлургия, 1979.
29. Степиов М. Н., Гиацинтов Е. В. Усталость легких конструкционных сплавов. М.: Машиностроение, 1973.
30. Марин Н. И. Статическая выносливость элементов авиационных конструкций. М.: Машиностроение, 1968.
31. Ратиер С. И. Разрушение при повторных нагрузках. М.: Оборонгиз, 1959.
32. Серенсен С. В^ Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975.
33. Ktinzi H.-и. In: Glassy Metals II, ed. H.-J. GCntherodt, H. Beck. Topics in Applied Physics. Vol. 52. N. Y.: Springer. Berlin, Heidelberg, 1982.
34. Masumoto T. — Sci. Rep. RITU. 1977. Vol. A26. P. 246.
35. Tonizawa S., Masumoto T. — Sci. Rep. RITU. 1977. Vol. A26. P. 263.
36. Masumoto T., Maddin R. — Acta Metallurgica. 1971. Vol. 19. P. 725.
37. Davis L. A., Ray R., Ohou C.-P., Q-Handley R. C.- Scripta Metallurgica. 1976. Vol. 10. P. 541.
38. Chen H. S.—Rept Progr. Phys. 1980. Vol. 43. P. 353.
39. Oilman **J. J.—J.** Phys. et radium (Paris). 1980. Vol.41. C. 8. P. 811.
40. Inoue D.. Kobayashi K-, Nose M., Masumoto T.- Ibid. 1980. Vol. 41. C. 8. P. 831.
41. Ishio S., Sato Y., Ikeda T., Takahashi M.//J. Non-Crystalline Sol. 1984. Vol. 61, 62, P. 955.
42. Bengus V. Z., Tabachnikova E. D., Startsev V. 1.— Phys. Stat. Sol. (a). 1984. Vol. 81. P. KH-

ГЛАВА 4

СЖИМАЕМОСТЬ

Б. В. Виноградов

4.1. ВВЕДЕНИЕ

Сжимаемость, или объемная упругость, есть обратимое уменьшение объема вещества под действием всестороннего давления. Количественно сжимаемость характеризуется величиной к, ,

где *V* — объем, м®; р —давление. Па; р —плотность, КГ-М-®. Употребляются также термины — коэффициент сжимаемости, несжимаемость, коэффициент несжимаемости. Величина, обратная сжимаемости, называется модулем объемной упругости К, Па, K=l/fe (модуль всестороннего сжатия, модуль сжимаемости, модуль несжимаемости).

Различают изотермическую ***кт*** и адиабатическую ***ks*** сжимаемости, которые связаны между собой соотношением [1]

где ср и ci/ —удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме, Дж-кг-"-град~'; ***Т*** — температура. К; а — объемный коэффициент теплового расширения. К-'. Для твердых тел при комнатной температуре различие между кт и ks обычно не превосходит нескольких процентов. (Б табл. 4.1, 4.2 адиабатическая сжимаемость отмечена индексом S, изотермическая — индексом ***Т.)***

Для анизотропных твердых тел относительное изменение размеров под давлением зависит от направления и в кристаллах характеризуется линейной сжимаемостью в направлении главных осей:

др) (4.3)

Сжимаемость связана с упругими постоянными s,/:

л

$$Sij = Si, -f S22 + S33 + 2 (S23 + Si3 -f S12), \quad (4.4)$$

Для изотропных твердых тел

$$\backslash Ik = K = El3(i-2^), \quad (4.5)$$

где ***Е*** — модуль Юнга, Па; ***а*** — коэффициент Пуассона.

Сжимаемость зависит от давления и температуры. Экспериментальные результаты зависимости объема твердых тел от давления представлены в табл. 4.1—4.4 в виде

$$\{V \sim V_)/Vo = - ap + 6/Я - Cffi, \quad (4.6)$$

Для некоторых данных приведена погрешность эксперимента (в круглых скобках, по последним значащим цифрам). В этом случае сжимаемость при давлении ***р*** определяется по формуле

$$fe = (a — 26p -f 3cp2) /(1 — ap + Ьр^ — cp^), \quad (4.7)$$

начальная сжимаемость ko=k{psz.O)=a. Часть результатов представлена в виде параметров уравнения Мурнагана [2]

$$K \quad (4.8)$$

или его модификации [3]

$$1 - S \quad (4.9)$$

где Я ' п р о и з в о д н а я модуля объемной упругости по давлению; | — безразмерный параметр.

Для идеального газа $v=RT/p$ и fe=l/p, где » —объем, м®-моль-'; —универсальная газовая постоянная, Дж-К-'-моль-'; Г — температура, К. Свойства реальных газов и жидкостей описываются более сложными р-н-соотношениями [4], например уравнением Тэйта

$$C\ln \frac{B + P}{б + Po} \qquad (4.10)$$

или логарифмическим уравнением

$$\frac{A}{\lg(p/p,) - A/v_o} \qquad (4.11)$$

В табл. 4.6, 4.9 приведены параметры уравнения Тэйта для ряда жидкостей и плотных газов. В этом случае сжимаемость k определяется выражением

$$fe(p) = C/(6 + p)\ (1 - C\ln \frac{B + P}{B + P,}) \bullet \qquad (4.12)$$

Часто р—и—7"-свойства газов и жидкостей характеризуют безразмерной величиной $Z^pw/RT,$ которая называется фактором сжимаемости. На рис. 4.1 показаны р—f—7"-соотношения в жидкостях и газах в виде семейства кривых $Z=Z(Tr, Pc),$ где $Tc=T1Tc\backslash$ $pc=p1pc\backslash$ To и Рс — приведенные температура и давление; Тс и Рс — критические температура и давление. В широкой области давлений и температур значения $Z,$ приведенные на рис. 4.1, отличаются от экспериментальных не более чем на 4—6 % для большинства веществ (кроме сильно полярных) [5].

Сжимаемости чистых жидкостей и газов, а также смесей можно рассчитать по данным [5]. Информация о сжимаемости и модулях всестороннего сжатия твердых тел и жидкостей содержится в [6]. Данные о сжимаемости и модулях всестороннего сжатия твердых тел содержатся в [7—10].

4.2. СЖИМАЕМОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ (табл. 4.1-4.6)

Таблица 4.1. Сжимаемость и модуль объемного сжатия элементов. Если не указаны p к $T,$ данные относятся к атмосферному давлению и комнатной температуре [буквами Г и S отмечены изотермическая и адиабатическая сжимаемости, $a,$ $b,$ с — коэффициенты уравнения (4.6)]

	$b,$ 10-и па-«					
Азот (65 К)*						P
Алюминий (Г)	12,676	3,347		78,877	3,165	[13
Аргон (4 К) (Г)				**2,86**	7,2	[11
Барий (Г)	105,69	152,21	1,124		1,725	[12:
Бериллий	9,97					
Бор	5,58	**0,8**				[71
Ванадий (Г)	7,011	3,245		139,42	18,24	[14]
Висмут (Г)	32,286	26,529		30,973	4,09	[11]
Водород (4 К)*	5000					[7]
(4,2 К) *(Т)*				0,170 (6)	7,0(3)	[15]
						[16
иара-Водород, (6—10 К)	5470(180)					
Вольфрам (Г)	3,475	1,123		300,09	19,10	[14
Гадолиний (Т)	27,271	14,029		35,479	4,77	[14
Галлий	20					
Гафний (Г)	8,8745			108,95	0.594	
Германий	12,93 [7]	3 ^ [7]		75,02 (S)	4,55 (S)	[181
Гольмий (Г)	25,2					12
Диспрозий (Г)	23,749	11,259		40,327	5,113	14
Европий	**86,62**	107,79	1,345			17
Железо (Г)	5,8441	1,5008		171,11	7J89	*И*
Золото (Г)	**6,01**	1,36		166,4	6,51	[19;
Индий (Г)	25,709	20,143	0,125	38,897	5,095	
Иод (Г)	114,89	337,83	6,331	8,37	6,047	14
Иридий *(Т)*	**2,82**					12;
Иттербий	78,1	93,01	1,108			[17
Иттрий (Г)	22,251	7,108		44,93	**2,2**	[и;
Кадмий (Т)	21,140	11,358		47,304	4,083	[п:
КалиШ (Т)	297,13	1440,4	48,26	3,40(1)	2,99(5)	[20;

Продолжение табл. 3. 55 *Продолжение табл.* 3.57

Элемент	*а.* 10-"" Па->	*Ь,* Па-2	с. Ю-- Па--	*К,* Ю» Па	*К'*
Кальций(Г)	54,757	54,206	0,395	18,263	2,616
Кобальт (Г)	6,02	2,599	–	167,1	17,327
Кремний *(Т)*	10.211	2,96	–	100,75	4,72
Криптон (77 К)*	560	–	—	–	–
Криптон (И 5 К) (Г)		–	–	1,34	7,94
Ксенон (4 К)		–	–	3,63	7,2
Лантан (Г)	40,623	31,874	0,183	24,617	2,863
Литий (Г)	80,037	100,97	0,675	11,8(2)	3,33 (9)
Лютеций (Г)	24,3	–	–		–
Магний *(Т)*	28,396	14,78		33,561	4,759
Марганец 303 К)	8,03	4,2	–		–
Медь (Г)	6,621	1,099	–	151,03	4,01
Мод[Ибден (Г)	3,951	1,115	–	253,1	13,288
/Лышьяк	31,6	–	–	–	–
Натрий (Г)	162,4	547,7	15,66		3,5(1,0)
Неодим (Г)	29,958	12,794	–		3,016
Неон (4 К)*	1006	–	–	–	–
Никель (Г)	5,5475	2,7045		180,26	16,58
Нпобий (Г)	6,778	2,549		144,2	14,5
а-Олово *(Т)*	9,01				–
р-Олово *(Т)*	18,155	6,123	–	55,081	2,715
Палладий	5,34	0,9	–	–	–
Плати14э	3,59	–	–	–	–
Плутоний	19,8				
Празеодим (Г)	33,824	19,278	0,132	30,223	1,612
Рений (Г)	2,69	–	–	–	–
Родий	3,67				
а-РТуГЬ (ШОК)	28,9	—	—	–	–
(200 К)	34,8	—	—	—	–
(234 К)	37,0	–	–		–
В.Ртуть (50 К)	21,7	–	–	–	–
Рубидий	369,76	2351,7	111,3	2,66 *(2)*	3,23 (2)
Рутений *(Т)*	3,11	–	–	–	
Самарий	26,38	10,46	0,0415		
Свинец (Г)	23,611	13,222		42,353	3,744
Селен (кристалл) (Г)	122,29	394,66	8,66	7,90	5,828
Селен ^стекло)	173		*"*		
Сера *(Т)*	103,5	276,14	4 j 89	8,843	6,55
Серебро (Г)	9,031'	2,317	–	110,73	4,681
Скандий	15,21	3,083	0,006	–	
Стронций (Г)	84,756	137,98	1,811	12,08	2,498
Сурьма (Г)	23,535	9,78	–	40,43	4,282
Таллий (7')	26,646	14,623		37,53	3,119
Тантал (7)	4,953	0,594		201,9	3,842
Теллур (Г)	47,716	74,735	0,66	18,242	8,404
Тербий *(Г)*	25,1				
Титан *(Т)*	9,1598	1,745	–	109,35	3,355
Торий *(Т)*	18,4	–	–	–	–
Тулий (Г)	25,2				
Углерод (алмаз)	1,817]	–	–	**560 (Л**	***йт)***
Углерод (графит)				**33,7 *(Т)***	12 (Г)
Уран		5			
Фосс)юр (белый)	205				
Фосс)юр (черный)	29,6				
Фос^)юр (красный)	55,6	—	—	–	–
Хром	5,25	0,9	–	–	–
Цезий (Г)	500	–	–	–	
Церш *(I)*	54,25	46,32	0,585		
Цинк (Г)	16,271	5,644		61,459	3,264
Цирконий *(Т)*	9,676	1,77		102,84	3,142
Эрбий (Г)	22,009	8,3045	–	44,913	3,537

Параметр £ уравнения (4.9) равен; −2, 3 −азот, 65 К; −1,9 − водород, 4К; −5,1 −криптон, 77 К: −4 − і

Таблица 4.2. Сжимаемость и модуль объемной упругости некоторых неорганических соединений [буквами ***Т к S*** отмечены изотермическая и адиабатическая сжимаемости, о, ***b, с***—коэффициенты в уравнении (4.6)]

(NHij^'s A1					
NH4Br (Г)	62,162	102,73	98,655		
ЫН4Н2ГО4	34,75—45,00				
NH4CI (Г)		104,55	96,573	17,8[9] (S)	
				255,07	4,19
	16,9 (Г)			5q,2[9](S)	
	3,74—30,9				
ад-				74,06	5,67
BaS04 (S)				22,3	
BaTiOg (куб.)					
(тетр.)	5,36				
BaF, (Г)	17,59	9,6		56,82	
Be,B (S)	**8,06**			124	
	8,13			123	
ад	4,13	4,3			
BN (гекс.) (Г)				25,5	
	5				
	3,47				
VgGe (S)				169,2 (3)	3,80 (22)
VgSi (S)				176,37 (7)	4,30(4)
VC	2,65				
Bijes	27,3				
HjO (4,2 K)	91,743				
H,0 VII, ***p=2,2*** ГПа				22,7	5,3
D^ VII, ГПа				24,2	4,6
	2,96				
w c'	1,58—1,73				
WC,,ow(S)	3,03(5)			3,29	
GaN	5				
GaAs ***(Т)***				74,66	4,67
GaSb (Г)				56,14	4,78
GaP (S)	11,27(6)				
HfGo,g67 (S)	4,12(2)			2^2	
0.0. ,r,				39,1(4)	2,2(5)
				25,9	6,15
				6,43	
HoZn„(S)				110(5)	
EuO				52 (5)	
EuSe				61 (5)	
EuS				40(5)	
EuTe				136	4,6
				138	5,6
FeAl (Л				***154***	3,4
FeO (Т)				161,6	
				98	
				174	4,6
Fe+8%^Si ***(Т)***				250	**–2, 0**
FegSi (Г)				155(1)	4,2(
Fe+5%Ni(0UK)				209,0(1,5)	4,0
(my)					
InBi	29.1				
InAs	17.2				
InSb	**22,0**			46,9 [9] (S)	
ln+10% T1	25,0				
InP	13,8				
YbO				130	
YbSe					
YbS				72 (5)	
YbTe				46(5)	

CdO (Г)					
As, ***(T)***	20				
	35,8	13,9	2,98		
CdS ***(T)***	26,3		1,43		
CdTe (Г)			1,09		
	63^6				
	60,351	53,606		15,5 [9] (S)	
ЙЙ	78,86	112,85		12,38 [9] (S)	
	61,814	78.118			
KCl (Г)	54,906	57,969			
CaO ***(T)***				**112, 0**	3,9
CaS (Г)				56,7	4,9
CoO	20(1) [441			190,5	
C0F2	9,2				
a-SiO^				36,4—37,7	
				56,5 [9] (S)	
SiOa (стишовит)				481,5(5)	
SiC	4,26				
liif	4,6				
				128,4 (3)	8,2(5)
LiBr (Г)	38,951				
LiH					3,80(15)
Li'H	29,8				
LiSH	29,5				
Li'D	29.4				
ЫIO	28.5				
Lil (Г)	57,466	66,674	43,154	**18,83 [9] (S)**	
LiF (7-)	15,491	6,5364		**69,8 [9] (S)**	
LiCl ***(T)***	30,342	13,705		**31,53 [9] (S)**	
MgO	,45—6,52			**178,0 [8] (T)**	4[8](Г)
MgCu, (S)				**87,99**	
Mg_2Sn (S)				**41,66**	
MgF; (Г)	**10,0**			—	
MnBi парамагнетик	26.4			—	
ферромагнетик	21,0			—	
MnO				**144,0**	3,3
MnAs 273 K	27,9			—	
315 K	57,9			—	
MnS (Г)				**81,0**	3 ^
MnF^ (T)	11.5				
CugAu	5,25—6,30				
CuBr (Г)	29,325	25,314	22,872		
CuGa	7,34—7,44				
CuGe	7,34—7,51				
Cu_2O				111,96(27)	
CuSi	7,17—7,53				
CuZn	7,47-7,87			116,279](S)	
$MoSi_2$	3,57				
Mo_5Si_2	9,79				
As_2Se_3 (стекло)	69.6 (S)			14,37(5)	
β-As_4S_3 ***(T)***				17,0	5,5
$NaNO_2$				21,£1(2)	4,3(8)
$NaNO_3$				25,8(6)	6,6(1,5)
NaBr ***(T)***	48,734	51,871	34,037	21,07 [9](S)	
$NaBrO_3$	32,4			30,81	
NaI ***(T)***	**66,622**		81,299	15,0	4,1 [8J
NaF ***(T)***	20,648	9,0621		45,6 [8	5,7 [8
NaCl ***(T)***	42,730	46,578	32,499	26,4 [8]	3,9 [81
$NaClO_3$	36,63-39,11			25,6 [9] (S)	
NiO ***(T)***				199,0	4,1
NiF_2 ***(T)***	8,Г[451			119,75	5,07
NbO_2 ***(S)***				236 (6)	
NbC	4,38f10]			320,0 (Г)	14,0(7-)
SnI_4	201 [58]			7,9 (Г)	5,8(7)
SnO_2 ***(S)***				212,3	5,13

продолжение табл. 4.2

а, 10-»« Па-»	10-«« Па-«	*с.* 10->» Па-»		
19.8				
76.9			13,81 [9](S)	
94.8				
38.1				
29.1			16,2	
64.0				
25.4				
24.0				
26,7				
			40(5)	
			15.1	
			40(5)	
27,93			37,0 [91(5)	
16,08—16,85				
24,981	13,451			
10.18			_ 1 (5)	
9,75—9,86				
10,02—10,38			86 [^ (Г)	3.6(81(7')
9.82				
9.4				
24.65				
23.51				
9,62—9,87	11,«		44,Г[9] (S)	
5,46 [10]			176 (Г)	4.4 (Г)
54			89,28	5,23
44.51				
45,45—50,42			22,5 [9] (S)	
43,92				
38J5			45 ~	5,0
			330~	3,3
2 2 ' 3				
3,42-3,47				
7.46			134	
3.98			251	
3,68				
6,12				
			220jT)	8 (Г)
			46,5	
5,35			210(10)	7(2)
			5,9	
4,36—4,38			203,7	
65,652	96,190	73,963		
78,488	130,42	115,48	18, 0[12,4 [9] (S)	
42.5				
56,401	73,842	54,194		
7.9				
10				
6,6				
22.2	3,7			
24.69				
13.1	4,10			
45.34				- I
24.27				
9.6				
3,74—3,77				
6,12				
5,9 (S) (S) [33]				

Таблица 4.3. Сжимаемость минералов [7].
Приведены коэффициенты уравнения (4.6)

Продолокете табл. 4.3

Вещрртво			Вещество			Вещество			Вещество		
Авгиг	10,2	—	Вюрцит	13,6		Мусковит	12		Фаялит	9,1	—
Альбит;	20,2	21,6	Галенит	18,7—	–	Нефелин	20,5	5,2	Флогопит	23,4	1g,2
Альмандин	5,45-	–		19,6		Ортоклаз	21,23	14,5	Флюорит	12,2—	6,5
	5,7		Гипс	25	–	Периклаз	5,98	1		12,6	
Анальцим	19,70—	-	Диопсид	9,3	3,1	Пирит	6,8—	–	Форстерит	7,9—	–
	36,73		Доломит	12,2			^ 7,1			8,2	
Ангидрит	18,4	—	Жадеит	7,5—	–	Родохрозит	13	–	Халькопирит	12,9	–
Англезит	19,4	—		11,1		Рутил	4,83	0,92	Хромит	4,9	–
Апатит	10,91	4,1	Ильменит	5,6		Сидерит	10	–	Целестит	15,7—	
Арагоиит	15,5	–	Иодаргирит	41,1	–	Сподумен	7,03	1,5		16,3	
Аргентит	25,1	33,8	Кальцит	13,67	3,9	Ставролит	8	–	Церуссит	19,1	-
Арсеиопирит	9,9	–	Кераргирит	24	–	Стронцианит	17,5	—	Цинкит	7,8	-
Барйт	17,7-	–	Кобальтин	7,67	1,9				Циркон	8,6	–
	18,1		Куприт	19,4	19	Сфалерит	13,03	1,28			
Берилл,	5,403	0.94	Лабрадор	13,9-		Тенардит	23,7	23.7	Эгирин	9,4	
Бромирит	27,4			15,0							
Висмутин	33,2	–	Марказит	8,2	–	Топаз	6,11	1,1	Энстатит	10,1	–
Витерит	20,3		Микроклин	19,2	13	Турмалин	8,16	1,95	Эпсомит	22,9	

Таблица 4,4. Сжимаемость и модуль объемной упругости органических веществ и полимеров

	k, Па->		*K*\ 10-" Па-1	Литература
Адама итан				[71]
Ант\захинон		8,092	11,016 —15,62	[72
Антрацен		6,786	8,960 —9,261	[72
Антрон'		7,344	9,061 —10,027	[72
Бензил		6,129	7,168 —7,063	[72
Бензофенон		6,421	10,328 — 12,413	[72
Гексабромбензол		8,089	11,067 —13,51	[72
Гексаметилбензол		5,600	10,272 —21,083	(72
Гексаметилентетрамин	117			[71
и-Гептакозан	193			
Гексахлорбензол			8,223	
парй-Дийодбензол		7,8	7,0	
Дифенил		4,570	9,942 -13,088	
S-10-дифенилантрацен		7,316	9,467 -11,258	
Нафталин				72]
Найлон 6 (Y)				73]
Пентаэритрит	83			71]
Перилен		10,141	7,701	
Перинафтенон		7,706	7,778 0,99	
Поли-1-бутилен	202			[72]
Поливинилиденфторид II	94,7			[71]
				[71]

Продолжение табл. **5.3 Продолясе**

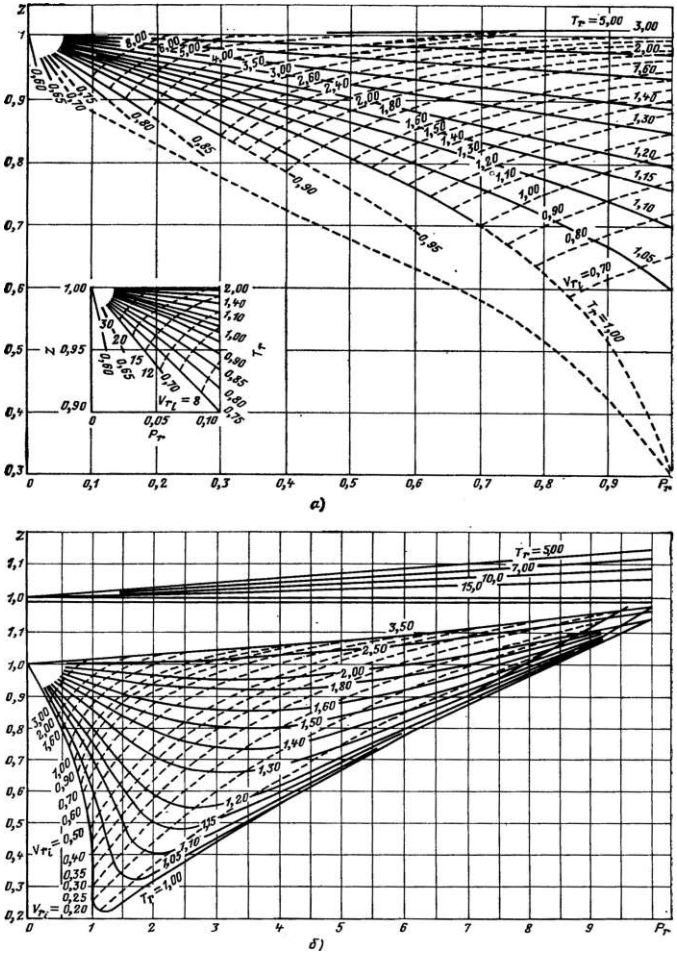
	ft, 10-"^ Па-'	, •; ?, к. 10-" Па	K'	К". 10-" Па-'	
по«пН(4-МеТ№l -пентай)	367				
Полиоксиметилеи	117				
Полипропийёй	207				
Политетраметилеиоксид-1	178				
Политетрафторэтилеи, 297 К	250	–	–	–	
Политетрафторэтилеи И, 283 К	189				
Полиэтилеи низкой плотисхгги	192	–	–	–	
Полиэтилеи высокой плотности	156				
Поли(этилеи-оксибензоат) а	138				
пора-Терфенил	–	5,428	9,689	—8.844	[72]

Таблица 4.5. Линейная сзчимаемость Щ— анизотропных минералов и органических веществ в направлении главных осей

Вещество	Ю-'г Па-'	10 '®Па-'	Па-'	Лите-ратура
Апатит	4,23	—	2,45	[7]
Барит	5,026	6,816	5,760	[7]
Берилл	1,664		2,075	[7
Графит	— 1,65	–	33,1	[7 *H*
Кальцит	2,73	–	8,22	[7]
Кварц	9,95		7,18	[7]1
Нафталин	55	31	26	7-i] -
Ортоклаз	10,13	5,59	4,C8	[7]
Парафин «-СзоНег (р = 3-J0s Па)	67	63	–	[75]
Парафин к-СзгНее (р=5-108 Па)	78	67	—	[75]
Полиэтилен высо-кой плотности	87,7	67,2	1,3	[711
Рутил	1,90		1,05	7
Сподумен	1,83	2,50	2,03	7
Топаз	2,176	1,504	2,429	7
Турмалин	1,65	/	4,86	7
Целестит	6,380	4,553	4,615	[7

Таблица 4.6. Линейная сжимаемость йг анизотропных элементов и неорганических соединений в направлении главных осей

	10-" Паг-	40-" Па-'	10-" Па-'	Р^^W?
ВаТЮз	1,9			
Be	2,87		2,23	I'
BN (гекс.)			34	
			18,7(7)	
bLT«3			12,7	78
In				[31
ItiBi				[79
Cd • '	2,299		15,88	[3
CdS	5,9		3,5	a,
Co	1,72			
Mg				
MnBi (ферромаг-нетик)	7,'9 (5)		10,6(2)	
MnBi (парамагне-тик)	5,2 (6)		10,5(2)	[51]
MnAs (273 K)	8,7 (9)		9,6,(3)	[51]
MnAs (315 K)	16,6(6)	23,4(8)		51]
MnP ..	1,53	1,54	*" ь Т*	81]
As	—4,6		26,4	
	22	14	15	i
	26,3(1,0)	**12,2(6)**	7,317)	I?
NaNOg	7,18 (6)		25(1)	
B-Sn	6,13		6,84	
PbTiOs	1,4		14,3	[83]
Se	—3,3		40	[84]
(SN). (106 Па)	55(5)		50(5)	[85]
(SN)j, (2-10» Па)	7			[85]
Sb (структ. As)	4,9		14,8	86]
Sb (куб.)	3,2		**20,6**	
Te	**28,01**		—4,23	f
TeOr	**8, 11**		6,11	
CrAs (190 K)	4,7	8,5		51
CrAs (293 K)	1,04(80)	**28,0(80)**		51
Zn	1,59		*Ш г*	
a-Zr	5,09(46)		5,99(93)	
to-Zr	3,€8 (29)		2,97(27:	87]
ZrSiOi	0,92 (7)		0,83(21:	


Z
P_r
T_r
V_{r_1}
а)
б)

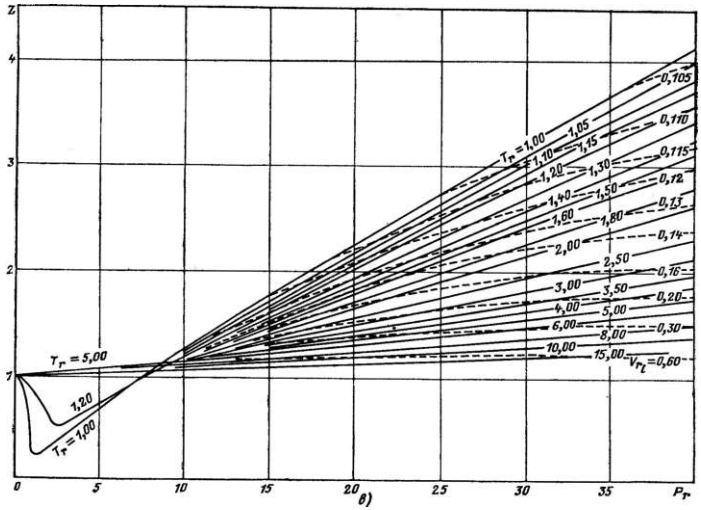


Рис. 4.1. Зависимость фактора сжимаемости жидкостей и газов Z от приведенного давления Р, при различной приведенной температуре Т, [5] (а — б — О ^ р ^ - ^ Ю ; е—0-<^р;.-<40)

Таблица 4.7. Параметры уравнения Тэйта и сжимаемость жидкостей

Жидкость	*т. к*	Диапазон давле^ний.	С	*в.* 1№ Па	*к.* Па-'	Литература
Ацетон	273	1—500			809	[89]
	273	500-1000			582	[89]
Бензин *(CJ^i* Н,4_5)	296,5		0,111	874		901
	373		0,111	585		90]
	423		0,111	200		
Бензол		0,4—18			859	а
Бром	293	100-200	–		570	91
Глицерин		1—10	–		217	89
Керосин	289,5	–	–	–	687	93
Масло:						
касторовое	–	–	–	–	470	92]
миндальное	290	–	–	.—	543	89]
парафиновое	287,8	–	–	–	619	93
прованское	293,5	–	„	–	625	93
Ртуть	293	–			40,4	[7]
Сероуглерод	273	1—500		–	652	[89
Спирт:						
бутиловый	290,4	8			888	89]
метиловый	273	1-500			784	89]
	293	1000—6000	0,1018	937		94]
	323	1000—6000	0,1018	774	–	94]
пропиловый	293	1000—8000	0,0870	913	–	94
	323	1000—7000	0,0870	731	–	94
этиловый	273	1-50			948	[89
	293	1—50			1106	89
Толуол	298				915	92
Углерод четыреххлористый	293	100—200			895	89
Этилацетат	286,3	8—37	–	–	1027	93

- Таблица 4.8. сжимаемость воДЫ'fe,' Ю-^^ Па-» [95]

р. 10' Па	Температура *t*, °С									
	0	ш'	*25*	40	50	60	70	80	90	' 100
0	50 885	47 810	45 246	44 240	44 174	44 496	45 161	46 143	47 430	49 018
	49 479	46 563	44 106	43113	} 43 021	43 296	43 891	44 783	45 959	47 413
2	48 122	45 362	43 012	42 037	41925	42 158	42 693	43 505	44 581	45 916
5	44 313	42 014	39 989	39 091	38 942	39 082	39 476	40101	40 943	41 991
10	38 745 ~	37 Ш	35 684	34 969	34 820	34 890	35 155	35 597	36199	36 943

Сжимаемость жидких металлов в точке плавления

Металл	10-" Па-«	*kj*..	литература	Металл	10-" Па-'	"m-" Па-	Литература
Барий	170	179	[95	Олово	27,5	—	[96
Висмут	36,5		96	Празеодим	40,8	41,7	[67
Галлий	21,6	–	96	Ртуть	9,2	–	[96
Индий	28,6	–	96	Рубидий	421	–	[96
Иттербий	99,1	116,9	[97	Свинец	28,8	–	
Кадмий	25,5	–	96	Стронций	116	131	
Кальций	82,7	ПО	95	Цезий	573	–	1
Лантан	41,0	42,4	97	Церий	52,2	53,0	
Магний	38,1	50,6	95	Цинк	19,2		
Натрий	175		[96				

Таблица 4.10. Сжимаемость расплавов [99]

Вещество		ь с о	Вещество	к	*h* 2 2
AiJe	467	860	LiCiOi	529	251
	489	890		561	230
Galg [100]	500	783	NaNOj	573	180
Inlg [100]	500	596	NaNOg	605	202
Ig	393	452		673	230
	413	527	Na_2S4	595	171
	443	646	Na^Ss	595	180
ICI	309	540	NaClOg	538	291
	341	630	RbN03[100]	623	203
Cdls	661	430		686	230
KNO3 [100]	623	185	AgBr	722	96
	723	257		791	111
KSCN	457	246	AgCl	731	84
	495	265		783	98
K^Crp,	684	167	C si	923	650
	741	187		973	690
LiNOs [100]	573	197	CsCl	944	410
	673	241		1021	484

Таблица 4.11. Коэффициенты уравнения Тэйта (4.10) и логарифмического уравнения (4.11) для плотных газов [4]

Вещество	*t*. °С	10"па	С	*в*, Па	л. см'1
Азот	0			—1200	
(Ро= 3-108 Па в	25			—1326	–.
уравнении Тэйта;	50			—1420	51,13
Ро = 2-108Па в ло-	100	3—12	0,3678	—1576	49,45
гарифмическом урав-	200			—1818	47,39
нении)	300			—1970	46,71
	400			—2100	46,16
Аммиак	50			673	87,7
($p_{кр}$= МО® Па в	100			142	74,67
уравнении Тэйта	150	1—10	, 3084	—184	66,76
и логарифмическом	200			—280	–
уравнении)					
Аргон	100			— 1610	45,33
(Ро = 3-108 Па в	200	3—10	0,3678	-1852	42,16
уравнении Тэйта;	400			-2165	39,78
Ро= 2-108Па в ло-					
гарифмическом					
уравнении)					
	25		0,4771	—1625	
Водород	50	3—7	0,4804	-1685	
(Ро = 3 -108 Па)	100		0,4852	—1766	
	150		0,4922	— 1843	–
	20		0,4776	-1995	
Гелий	50		0,5101	—1925	
(Ро = 3-108 Па)	100	3—7	0,5198	—1965	
	150		0,5276	—2005	– .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д., Лифшиц М. Статистическая физика,—2-е изд. м.:.Наука. 1964.

2. Murnaghan F. D.//Proc. Nat. Acad. Sci. 1944. Vol. 30. P. 244-248.

3. Birch F.//J. Geophys. Res. 1952. Vol. 57. P. 227—286.

4. Циклис Д. С. Плотные газы. М.: Химия. 1977

5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства жидкостей и газов. — 3-е изд.: Пер. с англ./Под ред. Б. И. Соколова. Л.: Химия 1982.

6. Landolt-Bornstein. Zahlenwerte und Functionen atis Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie, Gruppe IV, Bd 4, Eigenschaften der Materie bei hohen Drucken. Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer-Verlag, 1980.

7. Birch F.//Handbook of Physical Constants. N. Y.: Geological Soc. Am. 1966. P. 107—173.

8. Drickamer H. G., Lynch R. W., Cleridenen R. L. e.a.//Solid State Phys. 1966. Vol. 19. P. 135—228.

9. Лидерсон 0.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ. М.: Мир. 1968. Т. III Ч. Б. Динамика решетки.

10. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: Справочник. Киев: Наукова думка. 1982.

11. Vaidya S. N.. Kennedy G. C.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. № 10. P. 2329—2345.

12. Gschneidner K., Jr.//Solid State Phys., 1964. Vol. 16. P. 275-426.

13. Anderson M. S., Swenson C. A.//J. Phys Chem. Solids. 1975. Vol. 36. № 3. P. 145—162.

14. Vaidya S. N., Kennedy G. C.//Ibid. 1972. Vol. 33. M. 7. P. 1377—1389.

15. Anderson M. S., Swenson C. A.//Phys. Rev. B. 1974. Vol. 10. № 12. P. 5184—5191.

16. Ldovichenko B. G., Manzhelii V. G./ J. Low Temp. Phys. 1970. Vol. 3. № 4. P. 429—438.

17. Reynolds C. L., Jr., Barker R. E., Jr.//J. Chem Phys. 1974. Vol. 61. № 7(1). P. 2548—2549.

18. McSkimin H. J., Jayaraman A.. Andreatch P., Jr.// J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. № 5. P. 2362—2364.

19. Barsch G. R., Chang Z. P.//Phys. Stat. Solidi. 1967. Vol. re. № 1. P. 139 -151.

20. Vaidya S. N.. Getting I. C., Kennedy G. C.//J. Phys. Chem. Solids. 1971. Vol. 32. № 11. P. 2545—2566.

21. Stewart J. W.//Ibid. 1968. Vol. 29. № 4. P. 641-651.

22. Vaidya S. N.. Kennedy G. C.//Ibid. 1971. Vol. 32. No 5. P. 951-964.

23. Gust W. H., Holt A. C., Royce E. B.//J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. № 2. P. 550—560.

24. Champhousen D. L. e. a.//Phys. Rev. Lett. 1971. Vol. 26. № 4. P. 184—188

25. Chang Z. P., Graham E. K.//J. Phys. Chem. Solids. 1977. Vol. 38. № 12. P. 1355—1362.

26. Wong C.. Shuele D. E.//Ibid. 1968. Vol 29. № 8 P. 1309-1330.

27. Cline C. F., Stephens D. R.//J. Appl. Phys. 1965 Vol. 36, № 9, P, 2869—2873,

28. Францевич И. Н., Гнесин Г. Г., Курдюмов А. В. и др. Сверхтвердые материалы/Под ред. И. Н. Францевича. Киев: Наукова думка. 1980.

29. Garcia P. F., Barsch G. R.//Phys. Rev. B 1973 Vol. 8. № 6. P. 2505—2515.

30. Garcia P. F., Barsch G. R.//Phys. Stat. Solidi. B. 1973. Vol. 59. № 2. P. 595—606.

31. Akgoz Y. C., Farley J. M., Saunders G. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1973. Vol. 34. № 2. P. 141—149.

32. Holzapfel W., Drickamer H. G.//J. Chem. Phys. 1968. Vol. 48. № 10. P. 4798—4800.

33. Brown H. L. e. a.//Ibid. 1966. Vol. 45. № 2. P. 547-549.

34. McSkimin H. J., Jayaraman A., Andreatch -P., Jr. e. a.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 9. P. 4127-^128

P 4049 ^051"^"

36. Jorgensen J. D.//Ibid 1978 Vol. 49. № 11 P. 5473—5478.

37. Wang H., Simmons 0.//J. Geophys. Res. 1973. Vol. 78. Jo 8. P. 1262—1273.

38. Michel D. J.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. •№ 12. P. 5547—554«.

39. Jayaraman A. e. a.//Phys. Rev. B., 1974. Vol. 9. № 6. P. 2513 2520.

40. Takahashi T. e. a.//J. Geophys. Res. 1968. Vol.- 73 № 14. P. 4717—4725.

41. Chandrasekhar B. S., Rayne J. A.//Phys. Rev. 1961, Vol. 124. №4. P 1011-1014.

42. Jayaraman A.//Rev. Mod Phys. 1983. Vol. 55. № 1. P. 65—108.

43. Banus M. D., Lavine M. C.//High Temp. — High Press. 1969. Vol. 1. № 3. P. 269—273.

44. Sawaoka A. e. a.//Japan. J. Appl. Phys. 1974 ' Vol 13. № 3. P. 579.

45. Gerlich D. e. a.//Phys. Rev. B. 1984. Vol.29. № 4 P. 2142—2147.

46. Chattopadhyay T. e. a.//J. Phys. Chem. Solids. 1983. Vol. 44. № 7. P. 699-700.

47. Gerlich D., Smith C. S.//Ibid. 1974. Vol. 35. № 12. P. 1587 1592.

48. Stephens D. P., Lilley E. M.//J. Appl Phys. 1968. Vol. 39. № I. P. 177-180.

49. Cheng C. H.//Phys. Chem. Solids. 1967. Vol 28 № 3. P. 413—416.

50. Davis L. C. e. a.//Ibid. 1967. Vol. 28. № 3. P. 439—447.

51. Завадский Э. А., Каменев В. И.//Физика и техника высоких давлений. Киев: Наукова думка. 1980. № 1 С. 29—42.

52. Manghani M. H. e. a.//Phys. Stat. Solidi a. 1974. Vol. 25. № 1. p. 69—78.

53. Soga N. e. a.//J. Phys. Chem. Solids. 1973. Vol. 34. № 12. P. 2143—2148.

54. Chattopadhyay T. e. a.//Ibid. 1982. Vol. 43. № 9. P. 919—923.

55. Hazen R. M., Finger L. W.//J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. №11. P. 6826-6828. ' " ^^

56. Wu A. Y.//Phys. Lett. A. 1977. Vol. 60. № 3. P. 260-262.

57. Boyle W. F. e. a.//Phys. Rev. B. 1976. Vol. 14. №2. P. 526—530.

58. Peercy P. S. e. a.//J. Phys. Chem. Solids. 1975. Vol. 36, № 10. P. 1123—1128.

59. Chang E., Graham E. K.//J. Geophys. Res. 1975 Vol. 80. № 17. P. 2595—2599

60. Mullen M. E. e. a.//Phys. Rev. B. 1974. Vol. 10. № 1. P. 186—199.

61. Tosi M. P.//Solid State Phys. 1964. Vol. 16. P. 1 — 120.

62. Lippmann G. e. a./7Phys. Stat. Solidi a. 1971. Vol. 6, №2, KI59—K161.

63. Edwards L. R., Lynch R. W.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. 3. P. 573—574.

64. Lewis G. K. e. a.//J. Chem. Phys. 1966. Vol. 45. № 2. P. 598 600

65. Peercy P. S. e. a.//J. Phys. Chem Solids. 1975. Vol. 36. № 10. P. 1105—1122.

66. Banu-s M. D., Lavine M.//High Temp. - High Prcs 1970. Vol. 2. № 6. P. 671—679.

67. Benjamin T. M. e. a.//Ann. Rept. Dir. Geophys. Lab. 1980—1981. Washington D. C.: Carnegie Institution, s. a. P. 280—283.

68. Chattopadhyay T. e. a.//Phys. Rev. B. 1981. Vol. 23. № 6. P. 2471—2483.

69. Каменев В. И., Завадский Э. А.//Физика твердого тела. 1978. Т. 20. № 3. С. 933—935.
70. BarthoHn H., Florence D., Parisot D. e. a.//Phys. Lett. A., 1977. Vol. 60. № 1. P. 47—49.
71. Ito T.//High Pressure Science and Technology. Ed. by K. D. Timmerhaus und M. S. Barber. N. Y., Lond.: Plenum Press. 1979. Vol. 1. P. 482—490.
72. Valdya S. N.. Kennedy G. C.//J. Chem. Phys. 1971. Vol. 55. № 3(1). P. 987—992.
73. Hamamsy M. E., Elnahwy S., Damask A. C. e. a.// Ibid. 1977. Vol. 67. № 12. P. 5501—5504.
74. Losty H. H. W.//Modern Aspects of Graphite Technology/Ed. by L. C. F. Blackman. Lond.: Academ. Press. 1970. P. 204.
75. Кабалкиина С. С.//Докл. АН СССР. 1959. Т. 125. № 1. С. 114—117.
76. Кабалкина С. С. и др./Дам же. 1962. Т. 144. №5. С. 1019—1021
77. Кабалкина С. С., Верещагин Л. Ф.//Там же. 1960. Т. 134. № 2. С. 330—332.
78. Morosin B., Schriber J. E.//Solid Stat. Commun., 1972. Vol. 10. № 3. P. 249—251.
79. Верещагин Л. Ф., Кабалкиина С. С., Троицкая З. В.//**ДОКЛ.** АН СССР. 1964. Т. 158. № 5, С. 1061—1063.
80. Кабалкина С. С., Троицкая З. В.//Там же, 1963. Т. 151. № 5. С. 1068—1070.
81. Iwata N., Okamoto T.//Japan. J. Appl. Phys. 1975. Vol. 14. № 2. P. 248-252.
82. Pace N. G. e. a.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. №7. P. 1467—1476.
83. Кабалкина С. С., Верещагин Л. Ф.//Докл АН СССР. 1962. Т. 143. № 4. С. 818—821.
84. Верещагин Л. Ф. и др.//Там же, 1965. Т. 165. №2. С. 297—298.
85. Clarke R.//Solid Stat. Commun, 1978. Vol. 25. № 5. P. 333—336.
Колобяниина Т. Н. и . эксперим. и теорет. физ. 1970. Т. **59.** № 4(10). С. 1146—1155.
87. Olinger B., Jamieson J. C.//High Temp.-High Press. 1973. Vol. 5. № 2. P. 123—131.
88. Worlton T. G., Cartz L., Nlravath A.//Ibid 1972. Vol. 4. № 4. P. 463—469.
89. Handbook of Chemistry and Physics//37-th ed./Ed. by Ch. D. Hodgman. Clevelend; Ohio: Chem. Rubber Publ. Co. 1955—1956.
90. Масленникова В. Я-, Никифорова М. Б.//Докл. АН СССР. 1983. Т. 273. № 4. С. 871—873.
91. Техническая энциклопедия/Под ред. Л. К. Мартенса. М.: Советская энциклопедия. 1930. Т. 5.
92. Гайвороиский А. Т., Яковлев Ю. А.//Физика и техника высоких давлений. Киев: Наукова Думка. 1982. № 7. С. 69-74.
93. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных: Пер. с англ./Под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматгиз, 1962.
94. Атаиов Ю. А., Борзуиов В. А., Разумихни В. В./ Исследования в области высоких давлений/Под ред. Е. В. Золотых. М.: Изд-во стандартов. 1969. Вып. 104(164). С. 99—102.
95. Chen C. T., Fine R. A., Millero F. J.//J. Phys Chem. 1977. Vol. 66. №5. P. 2142—2144.
96. McAlister S. P. e. a.//Canad. J. Phys. 1974. Vol. 52. № 19. P. 1847—1851.
97. Вилсои Д. Р. Структура жидких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1972.
98. McAlister S. P., Crozier E. D.//Solid State Commun. 1981. Vol. 40. № 4. P. 375—378.
99. Cleaver B., Spencer E. D.//High Temp. — High Press. 1975. Vol. 7. № 5. P. 539—549.
100. Cleaver B., Zani P.//Ibid. 1972. Vol. 4. № 4. P. 463—469.

ГЛАВА 5

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ

Л. *и. Бабичев*

5.1. ВВЕДЕНИЕ

1. Приведенные значения плотности соответствуют плотности веществ при температуре 20 °С и атмосферном давлении, за исключением тех случаев, когда в скобках указана другая температура.

2. Значения плотности азота, брома, водорода, йода, кислорода, фосфора, фтора и хлора приведены для их естественного молекулярного состояния.

3. Приняты следующие сокращения; ам. — аморфный, б. — белый; г. — голубой, гекс. — гексагональный, ж. — желтый, ждк. — жидкий, з. — зеленый, к. — коричневый, куб. — кубический, крст. — кристаллический, мон. — моноклинный, ор. — оранжевый, ромб. — ромбический, е. —синий, сер. —серый, откл. — стекловидный, **ТВ. — твердый, триг. — тригональный, трикл. — триклинный, ф. — фиолетовый, ч. — черный, R — радиоактивный.**

4. В § 5.2 для ряда элементов приведены в круглых скобках приближенные значения атомной массы наиболее стабильного изотопа.

В § 5.3 римскими цифрами в круглых скобках указана— степень окисленностн элемента в данном соединении.

5. За более детальными сведениями рекомендуем обращаться к следующим изданиям: элементы П. 2], неорганические вещества [3], органические вещества [7], жидкости [12], ртуть и вода при различной температуре [12], пластмассы, сплавы, минералы, дерево и другие твердые вещества {8, **9, 14].**

Продолжение табл. 5.2

	Атомная масса, а. е. м.	
,N Азот	14,0067	1,2506-10-3 **0,808** (—195.8'С)ждк.
ggAc Актиний		10,07
,зА1 Алюминий	2М8154	2,6889
jsAm Америций	a	13,67
иАг Аргон		1,7837-10-3 1,40 (-186'С)ждк.
gjAt Астат	**(210)**	
5иВа Барий	137,33	3^594
4Be Бериллий	9,01218	1,848
8,Вк Берклий	ioten [5]	14,78 2,34 крст. 2,37 ам.
36Br Бром	79,904	3,119
ssV Ванадий	50,9415	5,96
щВ! Висмут	208,9804 1,00794 [7]	9,78 8,988-10-^ 0,0708 (—252,8 °С)ждк.
„W Вольфрам	183,85 3	19,35
,4Gd Гадолиний	157,25 3	7,895
3iGa Галлий	69,723 [4	5,904 (29,6 ^С) тв. 6,095 (29,8 °С) ждк.
Гафний	178,49	13.31
Гелий	4,	1,785-10-« **0,1221** (—268,9 "О ждк.
3jGe Германий	72,59 [3]	5,323 (25 °С)
„Но Гольмий	164,9304	8,795 (25 °С)
jjDy Диспрозий	162,50 [3]	8,550 (25 °С)
йЕи Европий	151,96	5,243 (25 'С)
ajFe Железо	55,847 [3]	7,874
„Аи Золото	196,9665	19.32
jgIn Индий	114,82	7,31
5sI Иод	126,9045	4,93
„Ir Иридий	192,22 [3]	22,42 (17 °С)
„Yb Иттербий (а-фаза)	173,04 [3]	6,965
39Y Иттрий	88,9058	4,469 (25 °С)
leCd Кадмий	112,41	8,65
„K Калий	39,0983	**0,862**
98 Cf Калифорний		
здСа Кальций	40^078 [4]	Ь,55
fi Кислород	15,9994 [3]	1,429-10-3 (-182,9°С)ждк.
27C0 Кобальт	B,9332	8,90
uSi Кремний	[3]	2,33 (25 "О крст. 2,0 (25 "О ам.
3akT Криптон		3,733-10-3 2,155 (—153,2°С)ждк.
64Xe Ксенон	131,29 [3]	5,8971-10-3 3,52 (—109°С) ждк.
sjCm Кюрий	(247)	13,51 расч.
5,1.3 Лантан	138,9055 [3]	6,145 (25 °С)
зЫ Литий	6,941 [2]	0,534

Элемент	Атомная масса, а.е.м.	Плотность, 103
aL u Лютеций	174,967	9,840
ijMg Магний	24,305	1,738
ssMn Марганец (а,р,тг,6-фазы)	54,9380	**7,21—7,44**
ssCu Медь	63,546 [3]	8,96
loiMd Менделевий	(258)	–
4jjMo Молибден	95,94	10,22
33AS Мышьяк (е., гекс..	74,9216	5,73
(^Т&ш.) (ж., ромб., •1-фаза)		4,7-5,1 1,97
цКа Натрий	22,98977	0,971
e„Nd Неодим (гене., а-фаза) (куб., р-фаза)	**144,24 Г3]**	7,007 6,80
joNe Неон	20,179	9,0035-**10-«** 2,205 (-246 "О ждк.
93NP Нептуний	237,0482	20,25
2jNi Никель	58,69	8,91
„Nb Ниобий	92,9064	8,57
вд8п Олово (е., куб., а-фаза)	**118,710 171**	5,85 7,29
Ь З А Г ' - '		
,eOs Осмий	190,2	22,57
4ePd Палладий	106,42	12,02
,gPt Платина	195,08 [3] •	21,45
94PU Плутоний (о-фаза)	(244)	19,84
gjPo Полоний (куб., а-фаза) (гекс., р-фаза)	**(209)**	9,32 9,4
69PГ Празеодим (гекс., а-фаза) (куб., р-фаза)	140,9077	6,773 6,44
eiPm Прометий	(145)	7,22 (25 ^С)
gjPa Протактиний	231,0359	15,37 расч.
esRa Радий	226,0254	5—6
seRn Радон	(222)	9,73-10-3 4,4 (—62°С) ждк.
7бHe Рений	186,207	21,02
jsRh Родий	102,9055	12,41
8„Hg Ртуть	200,59 [3]	13,5461 ждк. 14,193 (—38,9X) ТВ.
3,Rb Рубидий	85,4678 [3]	1,532
4tRu Рутений	101,07 [2]	12,41
62Sm Самарий (гекс., а-фаза) (куб., р-фаза)	150,36 [3]	7,536 7,40
esPb Свинец	207,2	11,336

Элемёнт	Атомпдя	Плотность, 10» кг/м»	Название	Формула	Плотность, 10» кг/м»
3jSe Селен (ч., сткл.)	78,96 131	4 28	Азот		
(к., мои., **р-фа-за)**		4;4б	(I) оксид		1,978-10-3
			(II) оксид		1,340-10-3
(с., гекс., **а-фаза)**		4,79	(III) оксид	N,03	1,45 (2°C)
(ам.)			(IV) оксид	**NO,**	1,49 (0°C) ждк.
		4,82	(V) оксид	**ЙЙ**	1,64
aeS Сера	32,066 [6]		**ДИ-, сульфда,** тетра-		1,90
(ж., ам., Y-фаза)		1,92			2,22 (15° C)
(ж., мои., Р-фа-за)		1,96	**тётра-, сульфид.** тетра-	**N4S4**	**1,54 (-129° C) ждк.**
(ж., ромб., а-фаза)		2,07	фторид ^, хлорид - J,		1,653
Серебро	107,8682 [3]	10,50	**АзбТИСТОВОДО|)ОД-**ная кислота	**ЩЗ**	1,09
2iSc Скандий	44,95591 [1]	2,989 (25° C)	Азотная **к^1СЛота**	HNO_3	1,513
3sSr Стронции **(куб., н-фаза)**	87.62	,2,63	Аммиак Гидразин	NH_3. N_2H_4	0,771-10-" 1,01
5iSb Сурьма	12) ,75 [3]	6,691	Нитрил фт^ид Нитрил хлорид	NQ^F NOaCl	2,90-10-» 2,57-10-3
giTl Таллий (гекс., а-фаза)	204,383	11,85	Алюминий		
-зТа Тантал	180,9479 '	16,654	борид, ди-	AIB2	3,19
5,Те Теллур	127,60. [3]	6,24 крст. 6,00 ам.	бромид гидроксид гидроксид оксид	**АШгз** AlO(OH)	3,01 (25° C) 2,42 3,01
„sTb Тербий	158,9254	8,272	иодид • карбид	AII3	3,95 2,36
4зТс Технеций	98,9062	11,49	нитрат	A1K0**3)3**-9H20	1,72
2,Ti Титан **(гекс., (х-фаза)**	47,88 [31 .	4,505	нитрид оксид (корунд)	AIN	3,13 3,97
			сульфат		2,71
soTh Торий	232,0381	11,72	сульфид		2,02 (13° Q
ggTm Тулий	168,9342	9,321 (25 °C)	фосфат, орто-	AIPO4	2,57
„С Углербд (графит) (алмаз)		1.8—2,1 ам, 1.9—2,3 3,15-3,53	фторид хлорид Америций	AIF3 AICl3	3,07 2,44 (25° C)
Уран (ромб.. а-фаза)	238,0289	19,040	(1\0оксид	АтОз	11,7
looFm Фермий	(257)		Аммоний		
ijP Фосфор (б., куб.) (к.,, трикл.) **(ч.,** ромб.)	30,97376	1,82 2,0—2,4 2,25—2,69	амид 1 бромид иодат иодид нитрат	NHjNg NH4Br NH_4IO_3 NH^'NO	1,346 2,40 3,31 2,51 1,725
g-Fr Франций	(223)	–	нитрит	NH_4NO_2	1,69
gF Фтор .	18,998403	1,696-10-3	**сульфат сульфид, гвдро-фосфат, гиДро-**	(NH4)HS*	1,77 1,17
ijCl Хлор	35,453	3,214-10-3 1,557(—35 °C) ждк.	фторид	$(NH_4)_2HP0_4$, NH_4F	1,62 1,015
,,Сг Хром	51,9961 [61	7,18-7,20	хлорат 1 хлорид	**NH4C103** **NH4C}**	1,80 1,53
55CS Цезий	132,9054	1,873	Барий		
ssCe Церий (гекс.. 7-фаза)	140,12	6,77	азид		2,936
3oZn Цинк	65,39 [2]	7,133	борид, гекса- бромид .		4,36 (16° C) 4,781 (24° C)
4„Zr Цирконий (гекс., ОС-фаза)	91,224 [2]	6,45	гидрид иодат	BaH, . Ba(10з), 1	4,21 5,00
ggEs Эйнштейнии	(254)	–	иодид карбид, ди-	**gt**	4,92 3,75
бвЕг Эрбий	167,26 [3]	9,066 (25 ^0	карбонат (7-фаза)	BaCOз	4,43

Название	Формула	Плотность, 10- кг/м>	Название	Формула	Плотность, 10> кг/м-
нитрат	Ba(ЫОз)2	3,24	(III) фторид	VF3	3,36
нитрид	BasN,	4,78 (25° C)	(IV) фторид	VF4	2,975
оксид	BaO	5,72	(V) фторид	VFs	2,18
пероксид	BaOr	4,96	**(II) хлорид**	VCl^	3,23
сульфат	BaS04	4,50 (15° C)	**(III) хлорид**	VCI3	3,00
сульфид	BaS	4,25 (15° C)	(IV) хлорид	VCI4	1,87
фторид	BaFo	4,83			
хлорид	Bad,	3,92	Висмут		
Бериллий			(III) бромид гидрок<;ид	**BiBrg**	5,60
бромид	**BeBr^**	3,47	**Bi (ОН)з**		4,36
гидроксид	**Be (OH),**	1,909	(III) иодид	**ВЛз**	5,64
иодид		4,33 (25".C)	иодид оксид	**BiIO**	7,92
карбид		1,90 (15° C)	(II) оксид	BЮ	7,15—7,30
нитрат		1,56	(III) оксид	Bi,03	8,9
нитрцд		2,71	(III, V) оксид		5,6
оксид		3,01	(V) оксид	**Bio"**	5,10
сульфат	BeS04	2,44	оксид фторид	**BiFO**	7,5
сульфид	BeS	2,36	оксид хлорид	BiClO	7,72 (15° C)
фторид	BeF,	1,99 (25° C)	сульфат	Bi (S04)3	5,08 05° C)
хлорид	BeCl,	1,90 (25° C)	(II) сульфид	BiS	
Бор			(III) сульфид фосфат, орто-	**Е Й .**	6,32 (15° C)
			(III) фторид	**BiF3**	8,75
бромид	BBrз	2,65	**(III хлорид**	BiCls	4,75
иодид	B1з	3,35 (50° C)	**Висмутовая кис-**	Bi^Os-nH^O	5,75
тетра-, карбид		2,52	лота		
нитрид	**11?**	2,34	Водород		
оксид	**B2O3**	1,844 крст.			
ДИ-, сульфид, три-	B.S3	1,55	бромид	HBr	2,16 (- 6 8 ° q
			иодид	HI	2,80 (—35°C)
фторид	BF3	2,99-10-3	селен ид	H,Se	2,12 (—42° C)
хлорид	BCI3	1,434 (0°C)	сульфид	H,S	0,96 (-60°,C)
Борная кислота, мета-	HBO,	2,49	теллурид	H p	2,57 (-20°'C)
			фторид		0,991 (19,4°a
Борная кислота. орто-	H3B03	1,435 (15° C)	хлорид	HCI	1,19 (—85°)
Гексаборан	**B6Ню**	0,69 (0°C)	Вода	H20	1,0000(4° C)
Декаборан		0,94 (25° C)	Вода тяжелак	0,0	1,104
Диборан	**№**	0,447 (—112° C) **ждк.**	Пероксид водорода (перекись водорода)	**H,o,**	1,442
Пентаборан	B5H,	**0,66 (0°C)**	Вольфрам		
Тетраборан	B4H10	**0,56 (—35° C) ждк.**	борид	W^B	17,7
Бром			борид, ди-	WB,	10,77
			(VI) бромид	WBr«	6,9
фторид, три-	BrPз	2,49	(И) иодид	WI,	6,9
фторид, пента-	BrPs	2,47 (25° C) ждк.	**(IV) иодид**	WI4	5,2 (18° C)
Бромоводород	HBr	3,645-10-3	**Карбид**	w c	15,7
Ванадий			**ДИ-, карбид**	w,c	16,06—17,3
			карбонил, гекса	W (CO)e	2,65
борид	VB,	5,10	(IV) оксид	w o.	12,11
бромид	УВrз	4.00	(VI) оксид	W03	7,16
иодид	**No**	5,44	силицид, ди-	WSi,	9,4
карбид		5,77	сульфид, ди-	w s ;	7,5 (10° C)
нитрид	VN	6,13	(VI) фторид	WFe	3,44 (15° C) ждк
(II) оксид	VO	5,76	(V) хлорид	WC15	3,875
(III) оксид	V,03	4,87	**(VI) хлорид**	WCle	3,52
(IV) оксид		4,34	**Вольфрамовая кис-**	H,W04	5,5
(V) оксид	V205	3,36	лота		
оксид фторид, три-	VF30	2,46(19° C)	Гадолиний		
оксид хлорид, три-	VC130	**1,83**	бромид	GdBrg	4,57
(11) сульфид	\ S	**4,20**	иодид	**Gdlg**	3,14
(III) сульфид		4,72	нитрат	**Gd (N03)3-GHjO**	2,33
(V) сульфид	**V2S5**	3,0			

оксид		
сульфат		
сульфид		6,15
фторид		7,05
хлорид	GdCls	4,52 **(0°C)**
Галлий		
(III арсенид	GaAs	5,35
III бромид	GaBfg	3,69 (25° C)
(III иодид	Gals	4,15 (25° C)
(I) оксид	Gap	4,77 (25° C)
(III) оксид	Ga,03	
(а-фаза)		5,88
(р-фаза)		6,48
(I) сульфид	Ga^S	4,2
(III) сульфид		3,65 (25-C)
(III) фторид		4,47
(III) хлорид	GaClg	2,47 (25" C)
Гафнии		
карбид	HfC	12,7
нитрид	HfN	13,9
оксид	HfOa	
сульфид	HfS^	**6,0**
Германий		
(IV) бромид	GeBr^	3,13 (29° C)
(II) иодид	Ge1,'	
(IV) иодид		4132 (25° C)
(IV) нитрид		5,25 (25° C)
(II) оксид		1,83
(IV) оксид	Geo,	
(а-фаза)		6,239
(^-фаза)		4,703
(II) сульфид	GeS	4,01
(IV) сульфид		2,94 (14° C)
(IV) фторид		6,65 . 10-3
(IV) хлорид	GeCl4	1,87 (25° C)
Герман	GeH4	3,42 . 10-3
Дигерман	Ge,He	1,98 (—100°C)
Тригерман	GegHs	**2.2**
Гольмий		
(III) бромид	HoBrз	4,86
(III) иодид	Hoi	3,24
оксид		8,35
фторид		7,83
Диспрозий		
бромид	DyBra	4,78
иодид	Dyl3	3,21
оксид		7,81 (27° C)
фторид		7,46
хлорид	ct	3,67 (0° C)
Европий		
(III) бромид	EuBrз	5,40
(II) иодид	Eula	5,50
(И) сульфат	EuSOi	4,99
(III) оксид		7,42
(II) фторид	***Щ'***	6,50
(III) фторид	EuFa	6,79
(III) хлорид	EuClg	4,89

Железо		
арсенид	FeAs	7,83
борид	FeB	7,15
(II) бромид	FeBr^	4,64
(II) гидроксид	Fe(0]	3,4
(III) гидроксид	Fe (01	3.9
(II) иодид	Feb	5,31
три-, карбид		7,4-7,67
(II) карбонат	FeCOg	3,8—3,9
карбонил, пента-		1,457
карбонил, тетра-	Й(CO)4	2.00 (18° C)
(III) **нитрат**	Pe(Шз)з-9H20	**1,68**
ДИ-, нитрид		6,35
(И) **оксид**		5,7
(II, III) оксид (магнетит)	Рез04	5,18
(III) оксид (гематит)	Pe^Oз	5,25
силицид	FeSi	**6.1**
(II) сульфат (железный купорос)	FeS04-7H20	1,90 (18° C)
(III) сульфат		3.10
(II) сульфид	Fe.(SO,)3	4,76
(III) сульфид		4,3
сульфид, ди-		5,03
		6,56
(II) фторид	rcr,	4,09 (25° C)
(III) фторид	FeFg	3,87
(II) хлорид	Feci,	**2,98**
(III) хлорид	FeCl3	2,90 (25° C)
Золото		
(I) бромид		7,90
(I) иодид		8,25
(III) сульфид		8,75
(I) хлорид		7,4
(III) хлорид		3,9
Индий		
(I) бромид		
(III) бромид		4,98
(I) иодид		4,75
(III) иодид		5,31
(I) оксид		6^99 (25° C)
(III) оксид		**7,18**
(III) сульфат		3.44
(I) сульфид		5,87(25° C)
(III) сульфид		4,90
(III) фторид		4,39 (25° C)
(I) хлорид		4,19
(III) хлорид		3.45
йод		
(I) бромид	IBr	4,42 (0°C)
(IV) оксид		4,2
(V) оксид		4,80
фторид, пента-	1^идн I2O4	3,5 ждк.
фторид, гепта		2,8 (6° C) ждк.
хлорид		
		3,18 (0°C)
	1	3,24 (34° C) ждк.

Продолжение табл. 5.3

		Плотность, 10' кг/м-
хлорид, три-	1С1з	3,19
Иодноватая кислота	НЮз	4,63 (0°С)
Иодоводород		5,789-10-3
Иридий		
(IV) оксид	1Ю,	3,15
(IV) сульфид		8,43 (25° С)
(VI) фторид		**6,0**
(III) хлорид	IrCl3	5,30
Иттербий		
II) бромид	YbBr,	5,91 (25°С)
III) бромид	УЬВгз	5,10
II) иодид	УЫг	5,40 (25° С)
(III) иодид	УЫз	3,33
(III) оксид		9,17
(III) сульфат		3,79
(III) фторид		8,17
(II) хлорид	YbCI,	5,08
Иттрий		
бромид	Y	3,95
карбид		4,13
нитрат		**2,68**
оксид (а-фаза)		4,84
сульфат		**2,61**
фторид		4,01
хлорид	YC13	
Кадмий		
бромид	CdBrjj	5,19
гидроксид		4,79 (15° С)
иодид		5,67 (30°)
карбонат		4,26 (4°С)
нитрат	g ^ N O , . . 6H5lO	| , 4 5 „ r Q
(II) оксид		
селенид	CdSe	5,81 (15°С)
силшит, мета-	CdSiOs	4,93
сульфат	CdS04	4,69
сульфид	CdS	
теллурид	CdTe	6;20(15°С)
фторид	CdF^	6,64
хлорид	CdCb	4,047
Калий		
азид	KN3	2,04
бромат		3,24
бромвд		2,76
гидрид	KH	1,47
гидроксид	KOH	2,04
иодат	**K,0.**	3,89
иодид		3,12
карбонат (поташ)		2,43
нитрат (индийская селитра)		2,11 (16°С)
оксид		2,32 (0°С)
периодат	KI04	3,62
перманганат	КМП04	2,70
пероксид		**2,18**
перхлорат	K(	2,52
селенид	K^Se	2,85 (15°G)
сульфат	K,S04	**2,66**
сульфат, гидро-	**KHS04**	2,32
сульфид	K,S	1,81 (14° С)
супероксид	KO2	2,14
теллурид	КгТе	2,51
оосфат, орто-		**2,26**
(угорид		2,48
оторид, гидро-	KHFj	2,37
хлорат	KClOЗ	2,32
хлорид	KC1	1,99
цианид	KCN	1,56
Кальций		
бориД, гекса-		2,3
бромат	Ca (Br0з)2-H,0	3,33
бромид	CaBr^	
гидрид (а-фаза)	CaHr	3.35 (25°С)
гидроксид	OMOH,	
иодид		2;24
карбид		3,96 (25° С)
карбонат (аргонит;		**2,22**
карбонат (кальцит	CaCOз	2,93
нитрат	Ca(Шз).	2,71 (25° С)
нитрид	Ca3N,	2.36
оксалат	CaQOi	2,63 (17° С)
оксид	CaO	2,2 (4° С)
селенид	Case	3.37
силикат, мета- (волластонит)	CaSiOs	3,57
(Р-фаза)		2,5
сульфат (ангидрит а-фаза)	CaS04	2,90
сульфат (гипс)	CaS04-2H20	2,90—2,99
сульфид (ольдгамит)		2,32 2;18 (15° С)
теллурид	CaTe	4,87
фосфат, мета-	Ca^^	**2,82**
фосфат, орто- (витлоктит, а-фаза		3,14
	CaзP,	2,51
РИД (флюорит, а-фаза)	CaF^	3,18
хлорид (гидрофилит)	CaCL	2,51 (25° С)
Кислород		
Озон		2,144-10-»
Кислород фторид		1,90 (—223,8° С) ждк.
Кобальт		
(II) бромид	CoBr,	4,91
(II) гидроксид	Co (OH)2	3,60
иодат		5,01
иодид	**S Г -**	
(о-фаза)		5,68
(р-фаза)		5,45
карбонат	**C0C03**	4,13
нитрат	Co (No3)2-6H2O	1,87—2,13
(II) оксид	CoO	5,7
(II, III) оксид	C03O4	6,07
(III) оксид	Co,Oз	5,18

Продолжение табл. 5.3

Название	Формулэ,	Плотность, Ю= кГ/М»
(II) селенид	CoSe	7,65
силикат, орто-	CoSi04	4,63
сульфат	C0SO4	3,71 25° C)
(II) сульфид	CoS^	5,45
(III) сульфид		4,8
сульфид, ди-		4,27
три-, сульфид, тетра-		4,86
фосфид		6,4 (16°C)
(II) фторид	g f .	
(III) фторид	C0F3	il''"
(II) хлорид	C0Cl2	2'94
(III) хлорид	C0Cl3	
Кремний		
(III) борид	51Bз	2,52
(IV) бромид		2,77
карбид	SiC	3,22
иодид	Sil4	4,2
нитрид	Si3N4	3,44
(И) оксид	SiO	2,13
(IV) оксид (кварц)	SiO^	2,65
OV) оксид (кристобалит)	SiO,	2,32
(IV) оксид (тридимпт)	SiOa	2,26
сульфид		2,02
фторид		4,684.10-=
хлорид	SiCU	1,48
Кремниевая кислота	H^SiOa	3,17
Ксенон		
(VI) оксид	XeOз	4,6
(И) фторид	XeF„	4,32
(IV) фторид	XeF4	4,04
(VI) фторид	XeFe	3,6
Кюрий		
(III) бромид	CтBгз	6,87
(III) иодид	Cmlg	6,37
(III) фторид	CmFg	9,70
(IV) фторид	CmF4	7,49
(111) хлорид	CnlCl3	5,81
Лантан		
борид	LaB«	2,61
бромид	LaBrg	5,07
гидрид	LaH3	5.83
иодид	LaI3	5,63
карбид		5,02
оксид	*Yfo*	6,51 (15°C)
сульфат	LS (804)3	3,60 (15°C)
сульфид		4,91 (1ГС)
фторид		5,94
хлорид	LaCI,	3.84
Литий		
арсенат, орто-		
борат, мета-	LiSf	3,07 (15°C)
		1,40 (42°O

Продолжение табл. 5.3

бромид		3,46
гидрид		0,78 (25° C)
гидроксид		1,46 (25° C)
иодид		4.06
карбонат		2.11 (0°C)
нитрат		2,36
оксид		2,01 (25° C)
пероксид		2,36
перхлорат		2,43
силикат, мета-		2,52 (25° C)
силикат, орто-		2,39 (25° C)
сульфат		**2,22**
сульфид		**1,66**
фосфат, орто-		2,54
фторид		2,63
хлорат		1.12
хлорид		2.07 (25° C)
Лютеций		
бромид	ЬиВгз	5,17
оксид	LUO3	9,42
иодпд	Lulg	3,39
фторид	LuFs	8,33
хлорид	**LUCl3**	3,98
Магний		
арсенид	MgsAs,	3,15 (25°C)
борат, орто-		2,99
бромид		3,72 (25"C)
гидроксид (брусит)	Mg (OH)2	2,35-2,46
иодат	Mд(10з)г-4H0	3,3
иодид		4,43 (25° C)
карбонат (магнезит)		2,96
нитрат	Jg(N03)..6H.0	1,464
нитрид		2,71 (25°C)
оксид (периклаз)		3,58 (25°C)
силикат, мета-	MgSiOs	3,18
силикат, орто- (форстерит)	Mg,Si04	3,21
силицид		•i,94
сульфат		**2,66**
сульфид	MgS	2,84
теллурид	MgTe	
фосфат, ди-		2,'559
фосфид		2,05
фторид		3,13
хлорид	**Mgci,**	2,32
Марганец		
арсенид	MnAs	6, 18
борид	MnB	**6,2**
борид, ди-	MnB_n	6,9
бромид	$MnBr_n$	4,38
гидроксид	Mn (OH).	3,26
иодид	MnI_n	5,0
три-, карбид	MnзC	6,89 (17°C)
карбонат	MnCOз	3,12
(II) оксид	MnO	5,44
(III) оксид (браунит)	Mn^Oз	4,50

Название		Плотность, 10^3 кг/м³
(II, III) оксид	Mn_3O_4	4,72
(fi-фаза)	Mr	5,03
(VII) оксид		2,40
селенид	Mr	5,55 (15°C)
силикат, мета-	MnSiOg	3,72 (25 °C)
силицид	MnSi	5,90 (15°C)
силицид, ди-	MnSiz	5.24 (13 °C)
ДИ-, силицид	Mn/	6,20 (15 "Q
(II) сульфат		3.25
сульфид (а-фаза)	MnS	3,99
фосфат, орто-	$Mn_3(P04)2$- 3H^C	3,102
фосфат, ди-		3,707 (25 °C)
фосфид		5,39
(11) фторид	MnFj	3,98
(II) хлорид	MnClz	2,98 (25 "Q
Медь		
(I) арсенид		8.0
борид		**8, 116**
(I) бромид (а-фаза)		4,72 (25°C)
(II) бромид	CuBr2	4,77 (25"C)
гидрид	CuH	5,30
(II) гидроксид	Cu(OH)2	3.37
(II) иодат	Cu(103).	5,24 (15X)
I) иодид		5,65
I) карбид	Cu_2CO_3	4,40
II) нитрат	$Cu(NO_3)_2 \times 3H_2O$	2,32
(I) нитрид	Cu_3N	5,84 (25°C)
(I) оксид	Cu_2O	**6,0**
(II) оксид	CuO	6,45
(I) селеинд	Cu_2Se	6,75 (30 °C)
(II) селенид	CuSe	5,99
силицид	Cu_5Si	7,53
(II) сульфат	$CuSO_4$	3,60
(II) сульфат (медный купорос)	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	**2,28**
(I) сульфид (медный блеск) (а-фаза)	Cu_2S	5,5—5,8
(II) сульфид (ковеллин)	CuS	4,68
(I) тиоционат	CuSCN	2,84
(И) фторид	CuF_2	4,23
I) хлорид (а-фаза)	CuCl	3,7
II) хлорид	$CuCl_2$	3,05
II) хлорид	CuCla • 2H2O	2.38
1) цианид	CuCN	2,92
Молибден		
борид		8,65
борид, ди-		7,12
ДИ-, борид		9,26
бромид		4,88 (17,5°C)
(II) иодид		5,28 (25 °C)
(IV) карбид		8,40
ДИ-, карбид (а-фаза)		
карбонил, гекса-		1,96
(IV) оксид		6,47
(VI) оксид)		4,69

Название		Плотность. 10» КГ/М»
оксид фторид, тетра-	MoF_4O	3,00 (25°C)
оксид ДИ-, фторид, ди-		3,49 (25°C)
силицид, ди-		6,31
(IV) сульфид		4,80
ДИ-, сульфид, три-		5,91 (15 °C)
(VI) фторид		2,55 (17,6"C)x{дк.
(II) хлорид		3,71 (25 X)
(III) хлорид		3,58 (25°C)
(V) хлорид		2,93 (25 °C)
Молибденовая кислота		3,11
Мышьяк		
(III) бромид	AsBrs	3,54 (25 °C)
(III) иодид	Aslg	4,39 (13°C)
(V) иодид		3,93
(III) оксид	As/Os	3.74
(V) оксид	As,05	4,09
(И) сульфид	AS2S2	3,20
(III) сульфид	As,S3	3,43
(III) селеннд	As^Sej	4.75
(III) фторид	AsFs	2,67 ЖДК.
(V) фторид	AsFs	7,71 • 10-3
(III) хлорид	AsClg	2,16 ЖДК.
Арсин (мышьяковистый водород)	AsHg	3.502 - 10-®
Мышьяковая кислота, орто-	H_3AsO_4.-'/2H20	2,0-2,5
Натрий		
	NaN_3	1.85
арсенат, мета-	$NaAsO_3$	2,30
ацетат	$NaCH_3COO$	1,53
борат, мета-	$NaBO_2$	2,46
борат, тетра-	$Na_2B_4O_7$	2.37
бромат	$NaBrO_3$	3,34 (17,5°C)
бромид	NaBr	3,21
гидрид	NaH	1.38
гидроборат, тетра-	$Na(BH_4)$	1,07
гидроксид (а-фаза)	NaOH	2,13
иодат	$NaIO_3$	4,40
иодид	NaI	3,665 (4°C)
карбид	Na_2C_2	1,58 (15 °C)
карбонат	Na_2CO_3	2,53
карбонат, гидро-	$NaHCO_3$	**2, 16**
нитрат	$NaNO_3$	**2,26**
нитрид	$NaNO_2$	2,17 (0°C)
оксид	Na_2O	2,27
периодат	$NaIO_4$	4,17
пероксид	Na_2O_2	**2,60**
перхлорат	$NaClO_4$	2,50
селенат	Na_2SeO_4	3,21 (17 X)
селенид	Na_2Se	2,63 (1C Q
силикат, мета-	Na_2SiO_3	2,4
сульфат	Na_2SO_4	2,70
сульфат (глауберова соль)	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	1,46
сульфат, гидро-	$NaHSO_4$	2,74
сульфат, ди-(пиро-сульфат)	$Na_2S_2O_7$	2,66 (25 °C)
сульфид	NasS	1.86 (14 °C)
сульфит	Na^SOa	2,63 (15 °C)

Продолжение табл. 5.3

		Плотность, 10» кг/м»
теллурид		2,90
фосфат, мета-		2.48
фосфат, орто-		2,54
фторид		2,79
хлорат	NaClOs	2.49 (15°C)
хлорид	NaCl	2,165 (25° C)
цианат	NaOCN	1,94
цианид	NaCN	
Неодим		
бромид	NdBrg	5,35
иодид		2,34
карбид, ди-		5,15
оксид	NdjOg	7,24
сульфат	$Nd_n(S04)3-8H20$	2,85
сульфид		5,18 (11°C)
хлорид		4,17
Нептуний		
азид		14,19
(III) бромид		**6.62**
(III) иодид		**6,82**
(II) оксид		13,35
(IV) оксид		11,1
сульфид		8,9
(III) фторид		9,12
(IV) фторид		**6,8**
(VI) фторид		5,0
(III) хлорид		5,58
(IV) хлорид		4,95
Никель		
антимонид	NiSb	7.54
арсенид	NiAs	7,57 (0°C)
борид	MB	7,39
бромид	NiBr^	4,64
гидроксид	Ni(OH),	4,15
иодат	Ni(I03)2	5,07
иодид	№l-2	5,83
карбонил, тетра-	Ni(CO)4	1,32
нитрат	б н р	2,05
оксид		7.45
селенид	NiSe	8.46
силицид	NigSi	7,2 (17°C)
сульфат	NiSOe	3,68
сульфид	NiS	5,3—5,65
фосфид	Ni^P	6,31 (15°C)
фторид	NiFg	4,63
хлорид	NiCla	3.55
Ниобий		
борид, ди-	NbB^	6,97
(V) бромид	NbBre	4,44
(V) иодид		5,11
карбид		7,74—8,
нитрид	NbN	8,40
(II) оксид	NbO	7,26
(IV) оксид	NbOg	5,9
оксид	NbPe	4,95
фторид	NbFs	3,29
хлорид	NbCls	2,75

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10» кг/м*
Олово		
(II) бромид	SnBfg	5,18 (17°C)
(IV) бромид	8ПВГ4	3,34 (35° C) ждк.
(II) иодид	Snl^	5,28 (25°C)
(IV) иодид	Snl4	4,47 (O'C)
(II) оксид	SnO	6,45 (0°C)
(IV) оксид (кассиterит) (а-фаза)	SnO,	6,95
(И) сульфид	SnS	**5,08 (0°C)**
(IV) сульфид	SnSj	4,51
(И) теллурид	SnTe	6,48
(IV) фторид	SnF4	4,78
(II) хлорид	SnClz	3,95 (25° C)
(IV) хлорид	SnCU	2,23 ждк.
Осмий		
(IV) оксид	OsOg	7,91
(VIII) оксид	OSO4	4,91 (22° C)
(IV) сульфид		9,47
(VIII) фторид	OsFg	3,87
Палладий		
бромид	PdBrjj	5,17 (16° C)
гидрид	PdHa	10,76
иодид	Pdiz	6,00
оксид	PdO	8,31
сульфид	PdS	6,60 (25° C)
(II) фторид	PdF,	5,80
(III) фторид		5,06
(II) хлорид	PdCla	4,08
Платина		
арсенид, ди-	PtASa	11,8
(II) бромид	$PtBr_n$	6,65 (25° C)
(IV) бромид	РШГ4	5,69 (25°C)
(И) иодид	Ptia	6,40 (25°C)
(III) иодид	Ptl3	7,41 (25°C)
(IV) иодид	ffi	6,06 (25° C)
(II) оксид		14,9
(IV) оксид	PtO,	10,2
сульфид	Pts	10,04 (25° C)
сульфид, ди-	PtSs	7,66 (25°C)
(III) сульфид	Pt.S3	5,52
фосфид, ди-	PtP^	9,01 (25°C)
(II) хлорид	Ptci^	5,87
(III) хлорид	PtCla	5,26 (25° C)
(IV) хлорид	PtCl4	2,43
Плутоний		
арсенид	PuAs	10,39
(III) бромид		6,69
(II) гидрид	PuH_n	10,40
(III) гидрид	PuH3	9,61
(III) иодид	И	6,92
(IV) карбид		13,5
нитрид	PuN	14,25
(II) оксид	PuO	13,89
(IV) оксид		11,44
сульфид	PuS	10,6
(III) фторид	PUF3	9,32
(IV) фторид		7,00
(VI) фторид	PuFe	4,86
(III) хлорид	PuCl3	5,70

		Плотность, 10> кг/м-
Празеодим		
бромид		5,26
иодид		2,31
карбид, ди-		5,10
(II, IV) оксид		7,07
(IV) оксид		**6,82**
сульфат		3,72 (16° C)
сульфид		5,24
фторид		6,14
хлорид	PrCl3	4,02 (25°C)
Протактиний		
(II) оксид	PaO	13,43
(V) оксид		9,0
(IV) фторид		6,36
(IV) хлорид	PaCи	4,72
Радний		
бромид		5,78
хлорид	RaCla	4,91
Рений		
(IV) оксид		11,4 (25°C)
(VI) оксид		6,9-7,3
(VII) оксид		**8,2**
оксид фторид, тетра-		3,717 ждк.
оксид, три-, хлорид		3,87
(IV) сульфид		7,51
(VII) сульфид		4,87
(IV) фюрид		5,38 (26" C)
(VI) фторид		3,62 ждк.
(V) хлорид		4,9
Родий		
(III) оксид	RhoOs	**8,20**
сульфид	К	6,40 (25°C)
фторид		5,38
(I) бромид	Hg_2Br_2	7,31
(II) бромид	$HgBr_2$	6,11 (25° C)
(I) иодид	Hg_2I_2	7,70
(II) иодид (а-фаза)	HgI_2	
(Р-фаза)		6,09
(I) иитрат	$Hg_2(NO_3)2\text{-}2H20$	4,78
(II) иитрат	$Hg(NO_3)_2 \times \times {}^1/_2H_2O$	4,39
(I) иитрит	$Hg_2(NO_2)_2$	7,33
(I) оксид	Hg_2O	9,8
(II) оксид	HgO	11,1
(II) селеиид	HgSe	8,27
(I) сульфат	Hg_2SO_4	7,56
(И) сульфат	$HgSO_4$	6,47
(II) сульфид (киноварь)	HgS	
		8,10
(Р-фаза)		7,73
(I) фторид		8,73 (15°C)
(II) фторид		8,95 (15°C)
(I) хлорат		6,41

		Плотность, 10- кг/м-
(I) хлорид		7,15
(И) хлорид		5,53
(II) цианид		4,00
Рубидий		
бромат		3,68
бромид		
гидрид		**2,60**
гидроксид		3,203 (11° C)
иодид		
иодид, три-		4;оз
карбонат		3,47
иитрат		3,11
нитрид		2.79
оксид		3,72
пероксид		3,65 (0°C)
перхлорат		2.80
селенат		3.90
сульфат		3.61
сульфид		2.91
ДИ-, сульфид, пента-		2.62 (15°C)
супероксид		
фторид		3,56
хлорид		2,76
Рутений		
(IV) оксид	$RuO_,$	6,97
(VIII) оксид	RU04	3,29
(IV) сульфид		6,99
(V) фторид	RuFs	2,96 (16,5° C)
(III) хлорид	RuCl3	3,11
Самарий		
(II) бромид	SmBr^	5,1
(III) бромид	ЗтВгз	5,40
(III) иодид		3,14
карбид		
(II) нитрат	8т(Ы0з)2-6Н20	2^38
(III) оксид		7,43 (15° C)
(III) сульфат	8тЙ04)з-8Н20	2,93
сульфид		5,73
(III) фторид		6,64
(II) хлорид		4,56 (25° C)
(III) хлорид		4,46
Свинец		
арсенат	Pb(As04)2	7,80
(II) бромид	PbBrг	6,67
иодат	Pb(10з),	**6,16**
иодид	PbIг	6,16
карбонат	**PbCOз**	6,56
нитрид	Pb(Нз)2	
да!		4,71
		4,93
нитрат	Pb(N03)2	4,53
(I) оксид		8,342
(II) оксид (**а**-фаза)		
		9,51
		8,70
оке	PbЪ04	8,79
(сурик)		

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность,, W кг/м'
(IV) оксид	РЬОг	9.67
		9,33
селенат	РЬ3еОл	6,37
селенид	SbSe	8,10 (15°C)
силикат, мета-	PbSiOs	6,49
сульфат	PbS04	'6,35
сульфид	PbS	7,59
теллурид	РЬТе	8,16
фосфат, орто-	Pb^(P04),	6,9-7,3
фторид		8,37
(о-фаза)		7.68
(р-фаза)		
хлорат	РЬ(С10з),	
(II) хлорид	PbCla	
(IV) хлорид	PbCl4	3,18 (0°C)
Селен		
(I) бромид		3,60 (15°C)
гидрид		2,00 (-42 С) ЖДК.
карбид		**2,68**
(IV) оксид		3,95 (16° С)
(VI) оксид		3,6
оксид фторид, ди-		2,67
оксид хлорид, ди-		2,42
сульфид		3,06 (0°C)
(IV) фторцд		2,75 (25°C) ЖДК.
(VI) фторид		2,26-10-3 (-35°C)
(I) хлорид		2,91 (17,5°C)
(IV) хлорид		3,80
Селенистая кислота		3,00 (15°C)
Селеновая кислота		2,95 (15°C)
Селеноводород		3,670-IO"'(g/
(I) бромид		2,63
рид		0,96 (—60°C)
оксид	sf	2,927-10-3
оксид	S03	1,97 ЖДК.
ДИ-, оксид хлорид, тетра-	S,OCl4	1.66 (0°C)
(I) фторид		1,5 (-100°C) ЖДК.
(IV) фторид		1,92 (-73° С) ЖДК.
(VI) фторид	SFe	6,50-10-3
ДИ-, фторид, дека-		2.08 (O'C)
(I) хлорид	1?	1.67 (25° С)
(И) хлорид		1,62 (15° С)
Двусерная кислота	F	1.9
Серная кислота		1,8305
Сероводород		1,538-10-3 (25° С)
Сульфурил фторид	SO.F,	3,72-10-3
Сульфурил фторид хлорид	SO^ClF	1,623-10-3 (0°C)
Сульфурил хлорид		1,67
Тионил фторид	SOI	2,93-10-3 ,
Тионил хлорид	SOCI2	1,655 (10,гС)
Хлоросерная кислога	HSO3CI	1,77
Серебро		
арсенат, орто- •	Ag3As04	6,66 (25°g
бромат	AgBrOj	5,21
бромид	AgBr	6,47 (25° С)

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10" КГ/М*
иодат	AglOs	5.53 (16,5' С)
иодид	Agl	5,71
(Р-фа!^)		5,61—5,67
карбонат		6,08
нитрат	AgN03	4,35
нитрит	*АфО^*	4,45
(I) оксид	Ag,0	7,22
(И) оксид	Ago	7,44
периодат	AgI04	5,57
перхлорат	AgC104	2,81
селенат	Ag,SeO.,	5,72
селенид	Ag,Se	8,0
сульфат (а-фаза)	Ag,S04	5,45 (29,2° С)
сульфид	Ag^s	7,32
теллурид		8,5
фосфат, орто-	Ag3P04	6,37 (25° С)
(I) фторид	AgP	5,85 (15°C)
(II) фторид	AgF.	4,57
хлорат	AgC103	4,43
хлорид		5,56
цианид	AgCN	3,95
Скандий		
борид	ScB,	3,65
бромид	ScBrg	3,91
оксид	5c,Oз	3,86
сульфат	Sc,S04)3	2,58
хлорид		2,39 (25°C)
Стронций		
борид	SrB,	3,39 (15°C)
бромид	SrBr^	4,22 (24° С)
гидрид		3,72
гидроксид		3,63
иодат		5,05 (15° С)
иодид		4,55 (25°C)
карбид	SrC,	3,2
карбонат	3rCOз	3,70
нитрат	Sr(N03),	2,99
нитрит	Sr(N02)2 • H2O	2,41 (0°C)
оксид		4,7
пероксид		4,56
селенат	***SrSeOi***	4,23
селенид	SrSe	4,38
сульфат	SrS04	3,96
сульфид	SrS	3,70 (15° С)
теллурид	SrTe	4,83
фторид	SrFj	4,24
фторид хлорид	SrClF	4,18
хлорат	Sr(C103)2	3,15
хлорид	SrCls	3,05
Сурьма		
(III) бромид	5ЬВгз	4,15
гидрид	5ЬНз	2,26-10-3
(III) иодид	Sbl3	4,92 (17=С)
(III) оксид (и-фааа)	Sb,03	5,19 (25°C)
(IV) оксид	Sb,04	4,07
(V) оксид	SbPe	3,78
сульфат		3,62 (4°C)
(III) сульфид	*i l i f " '*	4,64
(V) сульфид	SbjSe	4,12

Название	Формула		Назварие	Формула	Плотность т (СН. кг/м^
					Al:I
(III) теллурид	if-	6.50 (13",C)	Титан		
(III) фторид	SbFs	4,38 (25°C)	(I) борид	TiB	5,09
(V) фторид	SbCls	2,99 (23° C) ждк.	(И) борид	TiB^	4,50
(III) хлорид	SbCU	3,14	(И) бромид	TiBr,	4,31
(V) хлорид	5ьНз	2,34 ждк.	(IV) бромид (Р^-фаза)	TlBГ4	3,24
Стибин (сурьмянистый водород)		4,36-10-3 (15°C)	гидрид	TiHa	3,9 (1 2 ° C) '
			(II) иодид	Til,	4,99 ' '
Таллий			(IV) нодид	**Til4**	**4,40 (25"C)**
			карбид	**TiC**	**4.92** ^ ..
(I) бромид	TШг	7,56 (17° Q)	нитрид	**TiN**	**5,43**
(I) иодид	Tll		(II) оксид	**TiO**	**4.93**
(«-фаза)		7,07	(III) оксид		**4,6**
(Р-фаза)		7,30	(IV) оксид		**3,84**
(III) нодид		7,557	сульфид		**4,12**
карбонат	Tl'kOз	7,2	ДИ-, сульфид, три-	i	**3,58**
нитрат	TlNOg	^5,56 (21,4 C)	сульфид, ДН-	**TiSa**	**3,22 ""**
(I) оксид	Tl.,0	•9,52 (16°C)	фосфид	**TiP**	**3,95 (25°C) "**
(111) оксид	Tl2O3		(III) фтррпд	**TiF3**	**3,40**
перхлорат	TlClO4	*4/89*	(IV) фг()рид	**TiF4**	**'2,79**
селенид	Tl,Se	.9,05 (25°C)	(И) хлорид	**TiCI,**	**'3,13**
сульфат (а-фаза)		6,67	(III) хлорид	**TiCls**	**2,64**
(I) сульфид		8,46	(IV) хлорид	**TiC!4**	***,I,73***
тиоцианат	TISCN	4,96			
фосфат, орто-		'6,89 (10° C)	Торий		
(I) фторид (а-фаза)		,8,36	(IV) борид		
(III) фторид		•8,36 (25° C)	(VI) борид	ThB4	8,45
(I) хлорид		7,00	бромид	ThB,	6,4 (15°(:Г'
			гидрид	ThBr4	5,67
Тантал			иодид	ThH,	5,92
			карбид	ThU	6,00
борвд	TaB,	12,38	оксид	The,	
(V) бромид	TaBГб	4,67	силикат, орто-	ThO,	
(V) иодид	Tal5	5,80	силицид	ThSi04	6,82 (IG^'b' "
карбид	TaC	14,4	сульфат	ThSi.	:.7,96 (16°ef) •
нитрид	TaN	14,36	сульфид	Th(S04)2 '	4,22 • •" ",
(V) оксид (и-фаза)	Kg-	8,53	фосфат, мета-	ThS,	J , 36 ' • '
(V) фторид '		4,74	фосфид	Th(P03)4	•4,08 (16';Ч°C)
(V) хлорид	TaCls	3,76	фторид	ТЬзР4	i8,56
			хлорид	Thh	6,19
Теллур				ThCl4	
(I1) бромид	TeBr,	5.24			
(IV) бромид	TeBr4	**4,31 (15°C)**	Тулий		
гидрид	TeH,	**2,68 (—12°C)**			
(IV) иодид	Tei;	**5,40**	бромид	TraBгз	:5,02 ;!m
(IV) оксид	TcO,		иодид	Tmlj	'3,32
		•5,87	оксид		8,77 , i-3,
(а-фаза)		**,6,02**	фторид		
(VI) оксид	**TeOз**	,5,08			С 1 1
(VI) фторид		•2,56 (-26° q) ждк.	Углерод		
(I1) хлорид	**TeCla**	7,05	бромид	CBГ4	'3,42
(IV) хлорид	TeCli	3,26	иодид	Cl4	4,34 M. , , , ,
Теллуристая кислота	**H^TeOз**	,3,05	(И) оксид	CO	:i,25-10-'?, (0?<pV
Теллуровая кислота, орто-	НДеОе		(IV) оксид	C02	1,977-10-r?,,(Q?.p)
(а-фаза)		3,07	три-, оксид, ди- селенид	C302	**1,11 (OH/G) ждк,.-**
(Е(-фаза)		3,17	три-, сульфид, ди-	CSe,	**2,66 (25°C)**
Теллуроводород	НДе	5,81-10-3	сульфид	C,,S,	:i ,27
			сульфид, ди-(серо-	**CS**	,1,66
Тербий			углерод) •	**CS.**	1,263 .
			фторид •	CF4	1,96 (—,18ф°,C) 'ждк.
бромид	**TbBгз**	4,67	хлорид (четырех-	**CCU**	1,587
иодид	TbIз	•3,16	хлористый углерод)		
оксвд	Tb,Oз ,	7,81	Дициаи	(CN),	**2,335.10-й/ 'и'**
фторид	T№з	7,24	Карбонил бромид	COBr^	5,44 (П Г
хлорид)	TbCIз	4.35			г

Продолжение табл. 5.3

		Плотность, 10^3 кг/м³
Карбонил селенид	**COSe**	**1,81 (4°C)ждк.**
Карбонил сульфид	**COS**	**1,073-10-»**
Карбонил фторид	COF2	**1,139(—114° C)** ЖДК.
Карбонил хлорид (фосген)	**COCl**	**1,392-10-»**
Тиокарбоинл селенид	esse	**1,99**
Тиокарбонил хло-	**CSCl,**	**1,51 (15°C)**
Цианисводород	**HCN**	0,688 ЖДК
Уран		
борид	**UB,**	**12,70**
(III) бромид	иВгз	**6,53**
{IV) бромид	**UBr.**	**5,35**
гидрид	**S**	**10,95**
(III) иодид		**6,38**
(IV) иодия карбид		
карбид, ди-	**UCj**	**11,68**
(IV) оксид	uo^	**10,95**
(VI) оксид	**U03**	
(а-фаза)		**8.34**
(Р-фаза)		**8,02**
три-, оксид, окта		**8,30**
нитрид		**14,31**
сульфид	us	**10,87**
сульфид, ди-	**ill;**	**7,96 (25°C)**
(III) фторид		**8,96**
(IV) фторид		**6,7—6,9**
(V) фторид		**5,81**
(VI) фторид	UFe	**5,06**
(III) хлорид	UCl3	**5.35**
(IV) хлорид	UCl4	**4,87**
(V) хлорид	**uclf**	**3,81**
(VI) хлорид	ucu	**3,56**
Уранил ацетат	иО^Шзе€ООOsX	**2,89 (15° C)**
Уранил нитрат		
Уранил сульфат		**3,35**
Уранил фторид		**3,28 (16,5° C)**
Уранил хлорид		**5,8 расч. 5,28**
Фосфор		
(1П) бромид		**2,85 (15"C)**
(III) иодид		**3,89**
нитрид хлорид, ди		**1,98**
(III) оксид		**2,135**
(IV) оксид		**2,54**
(V) оксид	I "	**2.30**
тетра-, селенид,три	PaSes	**1.31**
тетра-, сульфид, три-	**P4S3**	**2,03 (17°C)**
тетра, сульфид, гепта-	P4S,	**2,19 (17°C)**
тетра-, сульфид, дека-		**2,03**
(III) фторид		**3,907-10-»**
(V) фторид		**5,805-10-»**
фторид, три-, хлорид, ди-	PC1,F3	**5,4-10-3**
(III) хлорид	**PCl3**	**1,57**
(V) хлорид	**PClf**	2,11

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10-кг/м-
Тиофосфорил бромид		**2.85 (17° C)**
Тиофосфорил хлорид		**1.64**
Фосфин		**1,529-10-3**
Фосфин, ди-		**1,012**
Фосфоний иодид		**2.86**
Фосфорил бромид		**2,82**
Фосфорил фторид		**4,8-10-3**
Фосфорил хлорид		**1,675** ЖДК.
Фосфористая кислота		**1.65**
Фосфориая кисло-| га, мета-		**2,2—2,5**
Фосфориая кислота, орто-		**1,83 (18° C)**
Фосфорноватистая кислота		**1.49**
Фтор		
оксид		**1,90 (—224°Q**
оксид, ди-		**1,45 (-57° C)**
фтороводород		**0,991(-19,9°C)ждк.**
Хлор		
гидрат-, окта-		**1,23**
(I) оксид		**3,89-10-3 (0°C)**
(IV) оксид		**IS**
(VII) оксид		
фторид		
фторид, три-		
Хлориая кислота		**1,768**
Хлороводород		**1,639-10-3**
Хром		
арсенид		**6,35 (16° C)**
борид		**6,17**
(II) бромид		**4,37**
(III) бромид		**4,25 (25°C)**
(И) иодид		**5.20**
(III) иодид		
карбид		
карбонил, гекса		
нитрид		
(III) оксид		**5.21**
(VI) оксид		**2,70**
оксид, ДИ-, хлорид, ди-		**1,91**
СИЛИЦИД		**5,5 (0°C)**
сульфат	g^soA	**3,01**
сульфид	**CrP**	**4,85**
II) фторид	CrPg	
(III) фторид		**3,78**
(II) хлорид	CrC?r	**2,88 (25° C)**
(III) хлорид	**CrCI3**	**3,03**
Цезий		
амид	**CsNH,**	**3,44 (25°C)**
бромат	**CsBrOs**	**4,11 (16°C)**
бромид	**CsBr**	**4,44**
гидрид	**CsH**	**3,41**
гидроксид	**CsOH**	**3,68**
иодат	**CSIO3**	**4,85**
иодид	**CsI**	**4,51 (25° C)**

Продолжение табл. **3.55**

	Формула	Плотность, 10' кг/м?
иодид- три-		4,47
нитрат		3,69
оксид		4,36
пероксвд		4,25
перхлорат		3,33 (4°C)
селенат	CsSeOi	4,45
сульфат		4,24
супероксид		3,77
фторид	CsF	3,59
хлорат	CбClЮз	5,57
хлорид	CsCl	3,97
цианид	CsCN	2,93
церий		
(IV) борид		
бромид	CeB4	5,74
карбид		5,18
иодид		5,23
		2,27
(III) оксид	^tb,	**6,86**
(IV) оксид		7,3
селенат		4,46
силицид		5,67 (17°C)
(III) сульфат		3,91
(IV) сульфат		3,91 (18°C)
сульфид		5.91
фосфат, орто-		5,22
фторид	CeP3	6,16
хлорид	CeC1з	3.92 (0°C)
антимонид	ZngSb,	6.33
арсенид		5,53
бромид		
гидрокеид		
иодид		4.g ,25-0
карбонат		
нитрат	2n(Шз)2-6H,0	2,07 (14°C)
нитрид	ZngN,	6,22 (25° C)
оксид	ZnO	5,7
селенид	ZnSe	5,42 (15°C)
силикат, мета-	ZnSiOs	3,42
силикат, орто-		4,103
сульфат	Ltcjf	3,74
сульфид	ZnS	
(а-,		4,09
		3,98—4,08
теллурид	ZnTe	6.34 (15°C)
фосфат, орто-		4,00 (15°C)
фосфид		4,55
фторид	i r	4.90
хлорид	ZnCl,	2.91 (25°C)
цианид	Zn(CN),	1,85
Цирконий		
борид	ZrB_2	6,09
гидрид	ZrH_2	5,74
ид	$Zr(OH)_4$	3,25
	ZrC	6,73
нитрид	ZrN	7,09
оксид	ZrO_2	5,68
селенит	$Zr(SeO_3)_2$	4,3
сликат, орто-	$ZrSiO_4$	4,56
силицид	$ZrSi_2$	S (22° C)
сульфат	$Zr(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	3,22 (16°C)

Продолжение табл. **3.57**

Название	Формула	плотность. 10» кг/м»
сульфид	ZRS,	3,87
фосфид	ZRP„	4,77 (25°C)
(IV) фторид	*Zfj1*	4,43
(II) хлорид	ZrCl^	3,16 (18° C)
(III) хлорид	Z'-Cls	3,00 (18°C)
(IV) хлорид	ZRCL4	2,80
Эрбий		
борид	ERB,	4,61
бромид	ERBR	4,93
иодид	ЕПз	3,28
оксид	Er^Oз	8,64
сульфат		3,68
сульфид		6,21
фторид		7,81
хлорид	EГC!3	4,1

5.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА [5, 7]

Название	Формула	10» КГМ»
Азетидин		**0,8465**
Азиридин	l i	**0,8349 (25° C)**
Анилин	CeH,BRN	**1,02173**
—2-бром-	QH,BRN	1,578
— 3-бром-	CeHeBrN	1,5793
-4-бром-	QHsN	1,4970 (100° C)
— Л/-метил-		0,98912
— 2-метил-	QHgN	0,99843
— 3-метил-	QUN	0,98912
— 4-метил-		0,9619
— 2-метокси-		1,0923
— 3-метокси-		1,096
— 4-метокси-	C7H0NO	1,071 (57° C)
— 2-нитро-	CgHgNaOo	1,442 (15° C)
— 3-нитро-		1,1747 (160° C)
— 4-нитро-	CeHeNp,	1,424
	Ж	1,1478
— 3-фтор-	CeHeFN	1,1580 (17,5° C)
— 4-фтор-	QH,C1N	1,1725
— 2-хлор-	CeHgClN	1,21251
— 3-хлор-	CeHj ClN	1,217
— 4-хлор-	СБНЮОВ	1,175 (70° C)
Арабиноза (а, р)		1,585
Ацетальдегид	ВГ3С2НО	0,7834
— трибром-	CI3C2HO	2,665 (25° C)
— трихлор-	C,HeO	1,5121
Бензальдегид		1,0447
—,оксим-		1,1111
— 2-гидрокси-		1,1674
— 4-гидрокси-	C,H5N03	1,129 (130° C)
— 2-иитро-		1,2844 (50° C)
— 3-нитро-		1,2792
— 2-фтор-	QHsFO	1,16 (15° C)
- 3-фтор-	QHsFO	1,176 (24° Q
-4-фгор-	QHBC1O	1,1811
— 2-хлор-	QHsC1O	1,2483
— 3-хлор-		1,2410

Продолжение табл. 5.3

		Плотность, 10^3 кг/м³
— 4-хлоп-	QHsClO	1,196 (61° C)
Бензилайин		0,9813 •
Бензо (с) изоксазол	**C,HsNO**	1,1827
Бензойнаи кислота		1,2659 (15° C)
— , азиД	C,H,ON3	1,1680 C)
— , амид		1,0792 (130° C)
— , бромангидрид	с Д о В г	1,5461
— , нитрил	qhJN	1,0052
—, фторангидрид	QH5OF	1,155
—, хлорангидрид	QHsOCi	1,212
— 2-амино-	QH-NOa	1,412
— 3-амино-	C,H,N02	1,5104 (4°€)
— 4-амино-	C,H,NO,	1,374 (25° C)
— 3-бром-	QHsBrO^	1,845
— 4-бром-	***C,H,BIO2***	1,894
— 2-гидрокси-	CjHeOg	1,443
— 4-гидрокси-		1,482 (25° C)
— 2,3-Дигидрокси-.	**Ж**	1,542
— 2-нитро-		1,575
— 3-нитро-	C-H5No4	1,494
— 2-фтор-	QHrFOS	1,460 (25° C)
— 3-фтор-		1,474 (25° C)
— 4-фтор-	Fo;	1,479 (25° C)
— 2-хлор-	**C:H.;ClO,**	1,544
— 3-хлор-		1,496 (25 C)
Бепзол		**1.0880**
— азидо —		1,0709 (22° C)
— 11азидо-3-метил-		1,0527 (22'C)
— 1-азидо-4-метил-	CHN-	1,0655 (25° C)
— бром-		1,4950^
— 1-бром-2-иод-	QH4BrI	2,2571 (25°C)
— 1-бром-2-метил-	QH,Br	1,4327
— **1**-бром-**2-метокси-**		1,5018
— 1-бром.-2гЛИтро-	QHjBrNOa	1,6245 (80° C)
— 1-бром-е-фтор-		1,7038
— 1-бром-3-фтор-	CeH^BrF	1,7081
— 1-бром-2-хлор-	CeHaBrCl	1,6444
— гексадейтеро-		0,9465
— гексафтор-		**1,612**
— 1,2-диёром-		1,9843
— 1,3-дибром-		1,9523
— 1,2-дибром-4-метил-	**cji**	**1,812**
— 1,2-дибром-4-т1тро-		2,354 (8° C)
-Т 1,2-дииод	QHjBr^NO,	2,54
— 1,2-динитро-		1,3119
— 1,4-динитро-	CeHX04	1,625
— 2,4-динитро-1-хлор-	CeH4N,04	1,4717
— 1,3-дифтор-	CвH3Cш204	1,1572
— 1,4-дифтор-	**СИИ**	1,1701
— 1,2-дихлор-	**cн'c1,**	1,3048
— иод-	QHtl	1,81548
— 1-иод-2-метил-	**QH**,l	1,7090
— 1-иод-3-метил-		**1,6981**
— 1-иод-2-нитро-		1,9786 (75° C)
— 1-**ИОД**-2 **(трифюрме-** тил)- ,,,	да	1,896 (26° C)
— Биод^3 (трифторме- **тил).**	QH4F3I	1,887
— 1-ирд-.4-фтор-	CвH4p1	1,9523 (15°C
— 1-ИОД-2-ХЛЮР-	с д а н	1,9515 (25° C)
— метил-(толуол)	***CjHs***	0,86694
— 1-метил:2,3-динитро-	C'HN,	1,2625 (111° C)
— 1-метил:2,4-динитро-		1,321 (70° C)

Продол **я** **с** *ение табл. 5.3*

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
— 1-метил-2,4-дихлор-		
— 2-метил-1,3-дихлор-		
— 1-метил-2-нитрб-		
— 1-метил-2-нитро-^ 4-хлор-		
— 1-метил-2,3,4-три-	CjHsNgOe	
-2-фтоо-	QH,**F**	
— 1- Ф ор	**C,H,F**	
– 1-N -2-хлор-		**Ж'**
— M€		
· 1 · 1 :и-2,3-динитро-		**Ж**
— 1- си-2-нитро-		
— 1-метокси-2-фтор-	**C.,H,FO**	
— 1-метокси-2-хлор-	**C,H,C10**	
— 1-нитро-2,3-д'ихлор-		
— нитропентахлор-i		
— 1-нитро-2-фтор-		
— 1-нитро-2-хлор-	QHJCIN02	
— пентафтор (трифтор- метил)- '	QFg	
— пентахлор-		
— 1,2,3-трибром-4-мет11л-	C,H,Brз	
— 1,3,5-тринитро-		
— трифторметил- (бензотрифторид)		
— 1-(три(^орметил)-2- -хлор-	" W I F ,	
— 1,2,4-трихлор-		
— фтор-		
— (фторметил)-	C,H,F	
— 1-фтор-2-(трифтор- метил)	C,H4F4	
— 1-фтор-2-(трихлор- метил)	C,H4Cl3F	
— 1-фтор-2-хлор-	QH4CIF	
— 1-фтор-3-хлор-	**Ж"**	
— 1-фтор-2-(хлорметил)-		
— хлор-		
— 1-хлор-2-(трихлорме- тил)		
— 1-хлор-2-(хлорметил)	QHeCi,	
Бензолсульфоновая кис- лота		
— , метиловый эфир	СДОз3	
— , фторангидрид	CgHsFOaS	
—, хлорангидрид	CeHsClOaS	
1,2,3-Бензолтриол		
Бензолтиазол		
— 2-хлор-		
1,4-Бензохинон		
— 2-метил-		
Биоксиран	QH^O,	
1.2-Бутадиен		
1.3-Бутад11ен		
1.2-Бутадиен, 4-бром-	*с &*	
1.3-Бутадиен, 1-йрОм-		
— 2-бром-		
— 1-бром-2-метил-	C4H5BГ	
— гексафтор-		
— гексахлор-		
— 1,4-дихлор-	***w***	
— 2-ИОД-'		

1.2-Бутадиен, 3-метил-	C5H8	0,6804
1.3-Бутадиен-2-метил- (изопрен)	QH,	0,6805
—1-метокси-	c^h^o	0,8296
—2-фтор-(фторопрен)	C4H5F	0,843 (4° C)
1.2-Бутадиен, 4-хлор-	QH5C1	0,9891
1.3-Бутадиен, 1-хлор-		0,9606
—2-хлор-(хлоропрен)	iCl	0,9583
2,3-Бутадиен-1-ол		0,9164
Бутадиин (диацетилен)		0,7364 (0°C)
Бутан	C4H10	0,5788
—1-бром-3,3-диметил-	QH^Br	1,1556
—1,4-дибром-	C4H8BI,	1,7890
—1,4-дииод-		2,349 (26° C)
—2,3-диметил-		0,6616
—2,2-диметил-3,3-дихлор-	C.H„C|,	0,8767
—1,4-дихлор-		1,1408
—1-иод-		1,6154
-2-иод-		1,592
—1-иод-2-метил-	C4H,I	1,5253
—2-метил-(изопентан)	CbHnI	0,6201
—2-метил-2-хлор-	CbHia	0,8653
—1-метокси-	CsHiiCi	0,7443
—1-нитро	QHi "	0,9710
		0,7789
—1-фтор-4-хлор.	QH^FCl	1,0627 (25° Q
—1-хлор-	C4H9CI	**0,8862**
Бутаналь	C4Ч0	0,8040
—, оксим	C4H8ON	0,923
-2-бром-	C4H,OBr	1,469
—2,3-дихлор>		**1,266**
-2-метил-	C5HL0	0,803
—4-метокси	CBHioOJ,	0,942
-2-оксо-		1,0285
—4-хлор-	C4l	1,107 (8,5° C)
—3-этокси-		0,897
Бутандиаль		1,064
Бутандиовая кислота (янтарная кислота)	c,H,o.	1,563
—, диметиловый эфир		1,1197
—, динитрил		0,9867 (60° C)
—, дихлорангидрид		1,3748
—, диэтиловый эфир		1,041
—2-гидрокси- 1,2-Бутандиол	CiH^O,	1,45 1,0024
Бутановая кислота (масляная кислота)		0,9577
амид		0,885 (120° C)
—, бромангидрид	QI:	1,4162 (17° C)
—, бутиловый эфир		0,8709
—, нитрил		0,7911
пропиловый эфир	. .4O2	0,8722
—, фторангидрид	C4H,0F	0,944 (11° C)
—, хлорангидрид	C4H,OCI	1,0277
—, этиловый эфир	H,	0,8790
—2,3-диоксо-, -этиловый		1,151 (26° C)
-2,2^дифтор-		1,22 (25° C)
-2-метнл	C^Hio	0,9340 (25° C)
—2-метокси-	CьHюOз	1,0486^
—4-метокси-	CaHюOз	1,0596
—2-оксо-	C4H6O3	1,20 (17° C)
— 4-хлор-		**1,2236**
— 2-этил-		**0,9239**
1-Бутанол		**0,8096**
2-Бутанол		**0,8063**
1-Бутанол, 2-амино-		**0,939 (26^ C)**
2-Бутанол, 1-амино-		**0,927 (17°C)**
1-Бутанол, 2,2-диметил-		**0,8273**
2-Бутанол, 2,3-диметил-		**0,8277**
2-Бутанол, 3-иод-		**1,7980 (15° C)**
1-Бутанол, 2-метил-		**0,8193**
2-Бутанол, 1-нитро-		**1,1303 (25° C)**
2-Бутанол, 1-хлор-		**1,0738**
2-Бутанон		**0,8054**
2-Бутанон, 1-гидрокси-	C4H8O2	1,026
2-Бутанон, 1-хлор-	C^HjOCl	**1,085**
1-Бутансульфоновая кислота	C4Hi„03S	**1,1906 (25° q**
2-Бутансульфоновая кислота	C4H10O3S	**1,227 (25° C)**
1-Бутантиол		0,8416
2-Бутантиол		**0,830**
1-Бутантиол, 2-метил-		**0,842**
2-Бутантиол, 2-метил-	CsHiaS	0,812
1,2,4-Бутантриол	CЛoOз	1,02
1-Бутен		**0,5951**
2-Бутен *(транс)*		**0,6042**
1-Бутен, 2-бром-3-метил-	CьHяBr	1,2328
1-Бутен, 1-бром-3-метил-	QH^Br	**1,2819**
2-Бутен, 2-метил-		**0,6623**
2-Бутен, 2-метил-1-хлор-	**C'H^Cl**	**0,9327**
2-Бутен, 2-метокси-	CбHюO	**0,8054 (15°C)**
1-Бутен, 2-нитро-	C 4 н Д м	1,0188
1-Бутен, октафтор-		**1,5443 (0° C)**
2-Бутен, октафтор-		**1,5297 (0°C)**
2-Бутен, 1-хлор-(тракс)		**0,9205 (15^ C)**
1-Бутен, 2-этил-		**0,6894**
2-Бутен, 1-этокси-		**0,7846**
2-Бутеналь (кретоновый альдегид)		**0,8495 (25° C)**
3-Бутеналь, 2,2-диметил-		**0,8184 (25° C)**
2-Бутеналь, 2-хлор-		**1,1404 (23° C)**
Бутендиовая кислота *(транс)* (фумаровая кислота)	C4H404	**1,625**
Бутендиовая кислота *(цщ:)* (малеиновая кислота)	**C4H404**	1,590
—, динитрил *(транс)*		0,9416 (111° C)
2-Бутен-1,4-диол *(транс)*		1,**080**
3-Бутен-1,2-диол		1,0466
1-Бутен-3-ин		0,7095 (0°C)
2-Бутеновая кислота *(транс)* (кротоновая кислота)		0,973 (72° C)
2-Бутеновая кислота *(цис)* (изокротоновая кислота)	C4H«o,	1,0267
3-Бутеновая кислота		1,0091
3-Бутеновая кислота, 2,2-диметил-	CeH,	0,963
3-Бутеновая кислота, 2-хлор-	C4H50,C1	1,237
2-Бутеновая кислота, 2-этил-	CeHюO,	0,9578 (50° C)

Продолжение табл. 5.3

		Плотность, 10^3 кг/м^3
2-Бутен-1-ол *(транс)* (протиловый эфир)	*е л о*	0,8532
2-Бутен-1-ол *(цис)*		0,8662
3-Бутен-1-ол	C4	0,8454
3-Бутен-2-ол	C4H80	0,8413
3-Бутен-1-ол, 2-бром-	QHjOBr	1,5130
3-Бутен-2-ол, 1-бром-	C4H,OBr	1,5205
3-Бутен-2-ол, 2,3-диметил	CeHi,0	0,8396
2-Бутен-1-ол, 2-метил-	C5H10O	0,863 (24= C)
3-Бутен-2-ол, 2-метил-	CsHioO	0,825
3-Бутен-1-ол, 2-хлор-	C4H,OCi	1,1044
3-Бутен-2-ол, 1-хлор-	C4H,OCi	1,1123
3-Бутен-2-он	C4HnO	0,8459
2-Бутен-1-тиол	C^HgS	0,883 (23° C)
3-Бутен-]-тнол	C4H8S	0,9087
Бутиламин	C4H11N	0,7414
б/тюр-Бутилзмин		0,724
трре/п-Бутиламнн		0,6598
Бутиламин, N, Л'-диметил	QHis-N	0,7206
— Л/-изопропил-	C,HI,N	0,741
— уУ-метил-	C5H13N	0,7377
—I-метил-	C5H13N	0,7424
тре/п-Бутилгидроперокснд	C4H10O2	0,8930
/прет-Бутилгипохлорит	C4H9OCI	0,9583
Бутилизотиоцианат		0,9546
трет-Бутилизотиоцианат	CsHgNS	0,9187 (10° C)
Бутилнитрат	C4H9O3N	1,0153
етор-Бутилнитрат	C4HSO3N	1,0264
Бутилнитриг	C4H80,N	
етор-Бутилнитрит	C4HeO,N	0,8728
трет-Бутилнитрит	C4HSO2N	0,867
1-Бутин		0,6784 (0°C)
2-Бутин		0,6510
1-Бутин, 3,3-диметил-		0,6695
2-Бутин, 1,4-диметокси-		0,9575
— 1,4-дихлор-		1,258
1-Бутин, 3-метил-		**0,666**
1.2-ГексадиеИ		0,7149
1.3-Гексадиен, 5-хлор-		0,9275
2.4-Гексадиеналь		0,898
1.3-Гексадиен-5-ин		0,7806
2.4-Гексадиенол		0,8967
1,4-Гексадиен-3-он		0,8959
1.4-Гексадиин		0,825 (0° C)
1.5-Гексадинн		0,8049
Гексан		0,6603
—1-бром-		1,1744
— 1,2-дибром-		1,5774
— 1,6-диод-		2,03
— 2,2-диметил-		0,6953
— 1,2-дихлор-		1,085 (15° C)
—1-иод-		1,4397
—-2-метил-		0,6787
— 1-фтор-		0,7995
— *I*-фтор-6-хлор-		1,015
—1-хлор-		0,8785
Гексаналь (капроновый альдегид)		0,8139
1.6-Гександиаль (адипиновый альдегид)	CeHxoO,	1,003

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Гександновая кислота (адипиновая кислота)	CeHio04	1,361 (25° C)
— , диметиловый эфир		1,060
—, динитрил	CeHgNa	0,9676
2,5-Гександиа(1	CвH,40,	0,9610
2,5-Гександион		0,9737
Гексановая кислота (капроновая кислота)		0,9274
— , метиловый эфир		0,8846
—, нитрил		0,8052
— , хлорангидрид		0,9754
1-Гексанол		0,8136
2-Гексанон		0,8113
1-Гексантиол		0,8424
1,3,5-Гексатриен		0,7420
1 ,к5-Гексатрнен *(цис)*		0,7175
1-Гексен		0,6731
2-Гексен *(транс)*		0,6784
2-Гексен *(цис)*		0,6869
3-Гексен *(транс)*		0,6772
3-Гексен *(цис)*		0,6796
2-Гексен, 2,5-диметил-		0,720
1-Гексен, 2-мегил-		0,7030
1-Гексен, 1-хлор-		0,8872
2-Гексеналь *(транс)*		0,8491
1-Гексен-3-ин		0,7492
1-Гексен-3-ол		0,834
Гексиламин		0,776
1-Гексин		0,7155
2-Гексин		0,7315
3-Гексин		0,7236
Гептан		0,68376
—1-бром-		1,140
— 1,1 -дихлор-		1,0008
— 1-иод-		1,3791
— перфтор-		1,7333
— 1-хлор-		0,8758
Гептаналь		0,8495
Гептандиовая кислота		1,329 (15° C)
1,7-Гептандиол		0,9569 (25° C)
2,4-Гептандион		0,9411 (15°C)
Гептановая кислота		0,920
1-Гептанол		0,8219
2-Гептанон		0,8111
1-Гептантиол		0,8427
1-Гептен		0,6970
1-Гептен-3-ин		0,7603
2-Гептен-4-ол		0,8445
3-Гептен-2-он *(транс)*		0,8496
Гептиламин		0,7754
1-Гептин		0,7328
2-Гептин		0,7480
3-Гептин		0,7527
2-Гептин-1-ол		0,884 (27° C)
Гидрохинон		1,358
Глиоксаль		
Диаллилсульфид		о;8877 (27° C)
Диаллилсульфоксид		1,0261
Диаллилсульфон		1,1215
Дибутиламин		0,7670
Дибутиловый эфир		0,7689
Ди-/ре/п-бутилпероксид		0,796

Дибутилсульфид	CigHigS	0,8386
Дивиниловый эфир	CiH^O	0,773
Дивинилсульфид		0,9174 (15° C)
Диизопропиламин		0,7163
N, iV'-Диизопропилгид-разин	C . H , Л	0,7929
Диизопропилдисульфид		0,9435
Диизопропиловый эфир		0,7241
Диизопропилсульфид		0,8142
Диметиламин		0,6804 (0°C)
N, W-Диметилгидразин	C^HeN^	0,7911
Диметилдисульфид		1,0647
Диметилдихлоргерманий		1,492
Диметилсульфат		1,3332 (15° C)
Диметилсульфид		0,8483
Диметилсульфит	CaHeO₃3	1,2129
Диметилсульфоксид	CaH^OS	1,1014
1,3-Диоксан		1,0319
1,3-Диоксолан		1,060
-2-метил-	Q F	0,9811
1,3-Диоксолан-2-он (эти-ленкарбонат)		1,3218 (39° C)
— 4-метил-	C3H4O;	1,2057
Дшропилдисульфид		0,9599
Дипропиловый эфнр		0,736
Дипропилсульфат		1,1064
Дипропилсульфид		0,8377
ДиПропилсульфоксид	C6HмO	0,9654
	CeHi404S	1,0278 (50° C)
	C6H14S	1,259 (17° C)
Диэтиламнн	C H P S	0,7059
N, W-Диэтилгидразин		0,8004
Диэтилдисульфид		0,9931
Диатиловый эфир (этиловый эфир)	i f	0,71378
-1,2-дибром-		1,7315
— 1,1-ДНХЛ0р-		1,1285
-1-хлор-	CiHgOCi	0,9493
-2-хлор-		0,9894
Диэтилпероксид^ (перекись этила)	QHiS	0,8240
Диэтилсульфат		1,1842 (15° C)
Диэтилсульфид		0,8362
Диэтилсульфит		1,0829
Изобутиламин		0,7346
Изобутилизотиоцианат	C5H9NS	0,9638 (14° C)
Изоксазол	C3H3NO	1,078
ИзЬпентиламин	C5H13N	0,7491
Изопентилнитрат		0,9961 (22° C)
Изопропеинлизоцианат		0,8776
И	C3H4N2	1,0303 (101° C)
— 1-метил-		1,0325
Инден	i ?	0,9957
Индол	CH^N	1,0718 (56° C)
Индолин		1,069
Кетен	*c,H,o*	1,45-10-3
—, диэтилацеталь	C4H1202	0,8776 (25° C)
Ксилоза		1,525
Малоновая кислота		0,619 (16° C)
—, диметиловый эфир	*CsHsO,*	1,1528
—, диинтрил	CsH^N,	1,1910
—, дихлорангидрид		1,4509
—, диэтиловый эфир		1,0551
— метил- (изоянтарная кислота)		
Метан	CH4	0,466 (—164°C)
— азидо-	CH3N3	0,869 (8° C)
— бром-	CH3Br	1,6755
— бромдифтор-	CHBrFa	1,55
— бромдихлор-	CHBrCla	1,98 (16° C)
— бромиод-	CH^BrI	2,926 (17° C)
— бромтринитро-	COeNgBr	2,0313
— бромтрихлор-	CBrCig	2,0122
— бромфторхлор-	CHBrClF	1,9771 (0°C)
— дибром- (бромистый метилен)	CH2BI'2	2,4970
— дибромдихлор-		1,42 (25° C)
— дибромфтор-	CHBr^F	2,421
— дибромхлор-	CHBr^Cl	2,451
— дииод-(иодистый метилен)		3,3240
дииодфтор-	CHFI„	3,1969 (26° C)
—днинтрохлор-	CHCl„(N02)2	1,6123
— дифенил-	88И	1,0060
— дифтор- (фтористый метилен)		0,909
— дифтордихлор- (фреон-12)		1,64 (—73° C)
— дифторхлор-(фреон-22)	CHCiF^	1,4909 (—69°C)
— дихлор- (хлористый метилен)	CH2Cl2	
— иод- (иодистый метил)	CH3I	2,279
— иоддифтор-	CHFjI	3,238 (—19°Q
— иоддихлор	CHCI2I	2,392
— иодтрихлор-	CCI3I	2,355
— иодфтор-	CH2FI	2,366
— иодхлор-	CHaCil	2,422
— нитро-	CH3NO2	1,1382
— нитротрихлор- (хлорпикрин)	CHCI3NO2	1,6566
— нитрофенил- (а-нитротолуол)	C4H8NO,	1,1598
— нитрохлор-	CH^CiNO,	1.466 (15° C)
— тетрабром- (а-фаза)	CBЛ	2,9609 (100° C)
(Р:фаза)		3,273
— тетраиод-		4,23
— тетранитро-	C(NO,)4	1,6380
— тетрафтор-	CF4	1,619 (-129,8°C)
— тетрахлор-	CCi4	1,5940
— трибром- (бромоформ)	CHBr3	2,8899
— трибромнитро-		2,7930
— трибромфтор-	S r -	2,7648
— трибромхлор-	CBГ3Cl	2,71 (15°C)
— триод-(иодоформ)	CH13	4,008
— тринитро-(нитроформ)	CH(N02)3	1,648 (13° C)
— тринитрохлор-	CCi (NO,)3	1,6769
— трифтор-(фтороформ)	CHF3	1,52 (—100" C)
— трихлор-(хлороформ)	CHCl3	1,4832
— фтор-(фтористый метил)	CH3F	0,5786
— фтордихлор-	CHCl^F	1,405 (9°C)
— фтортрихлор- (фреон-11)	CCI3F	1,4995 (15° C)
— хлор-(хлористый метил)	CHgCi	0,9159

Название	Формула	Плотность, 10= кг/м=	Название	Формула	Плотность, 10= КГ/М»
Метанол	CH4O	0,7914	—1-бром-	C6HцB!	1,2182
Метанол-D	CH3OD	**0,8127**	— 3-бром-3-метил-	C6HиBr	1,1835
Метансульфоновая кислота	CH4O3S	**1,4812**	— 1,5-дииод-	QHxo1,	2,1903 (15° C)
Метантиол (метилмеркаптан)	CH4S	0,8665	— 2,2-диметил-	QHie	0,6739
			— 1,2-дихлор-		1,0872
Метиламин	CHsN	0,6628	— 3,3-диэтил-	C9H20	0,7536
Метилгидразин	**CHe-Ng**	0,8733	— 1-иод-	C5H11I	1,5161
Л'-Метилгидроксиламин	**CH5ON**	1,0003	— 2-метил-	CeHi4	0,6532
Метилгидропероксид	CH4O,	0,9967 (15° C)	— 1-метокси-		0,7606
Метилизотиоцианат		1,0691 (37° C)	— 1-нитро-	CsHijNOa	0,9525
Метил изоцианат	**C H Ш**	0,9744 (15°C)	— 1-фтор-	C5H11F	0,7907
Метилнитрат	**c f i ^ N**	1,2075	— 1-хлор-	C5H„CI	0,8818
Метили итрит		0,991	— 3-этил-	QHie	0,6982
Метилтиоцианат		1,0678 (25° C)	Пентаналь (валериановый альдегид)		0,8095
Метилтрихлоргерманий	**c f ^ ^ c i g**	1,73 (24,5°C)	Пентандиовая кислота		**1,192 (106° C)**
Морфолин	***CiUfiU***	1,0005	(глутаровая кислота)		
Муравьиная кислота	CHPa	1,22	— , димегиловый эфир	C,Hi,04	1,0876
— , аллиловый эфир		0,946	— , динитрил		0,9911 (15° C)
— , амид (формамид)		1,1334	— , дихлорангидрид		1,3241
— , бутиловый эфир	CBHЮO,	0,8265	1,2-Пентадиол	C5H1Д	0,9802
— , гексиловый эфир		0,8813	2,3-Пентадион	QH/),	0,9565
— , гептиловый эфир		0,8784	Пентановая кислота (валериановая кислота)	CsHioO,	0,9391
— , изобутиловый эфир		0,8854			
— , изопентиловый эфир		0,8857	— , метиловый эфир		0,8947
— , изопропиловый эфир	C^HgOg	0,8774	—, нитрил		0,7992
— , метиловый эфир	COH40	0,9705	—, хлорангидрид	C5H9OCI	1,0155 (15° C)
— , нитрил (водород цианистый)	CHN	0,6876	— , этиловый эфир		0,8770
			— 2-бром-		1,381
— , пентиловый эфир		0,8853	— 2-метил-	CeHiPa	0,9230
— , пропиловый эфир	***c l n h***	0,9039	— 4-оксо-(левулиновая кислота)	C5H8O3	1,1335
— , фторангидрид	CHOP	1,099 (0°C)			
— , этиловый эфир	C5H6Oa	0,9168	— 3-хлор-	C5H,o.ci	**1,1484**
Надуксусная кислота (гидроперекись ацетила)	**C Л O з**	**1,226 (15° C)**	1-Пентанол (амиловый спирт)	C5H120	0,8144
Нафталин		1,0253	2-Пентанон	CsHioO	0,8089
Неопентиламин	**C s f c**	0,7455	1-Пентантиол		**0,8421**
Норборнадиен	C H	0,9064	1-Пентен		**0,6405**
Оксетан	CHeO	0,9001	2-Пентен ***(транс)***		0,6482
Оксетан-2-он	***c Л o ,***	1,146	**2-Пентен *(цис)***		0,6556
Оксиран	***c K o***	0,8971 (0°C)	**1-Пентен, 1-бром-**		1,2391
— винил-	***CiHfi***	0,8745	1-Пентен, декафтор-		1,2571 (25° C)
— гидроксиметил-		1,1143 (25° C)	2-Пентен, 2,3-диметил-		0,7227
— 2,2-диметил-	**c M o**	0,8112	1-Пентен, 2-метил-	CeHia	0,6799
— метил-	C3HaO	0,8311	2-Пентен, 2-метил-	**CHi,**	0,6863
— 2,3-тетрамегилен	C6HюO	0,9718	1-Пентен, 3-хлор-		0,8988
— фенил	QHsO	1,0592	1-Пентен, 2-этил-		0,7079
— хлорметил-	CgHjOCl	1,180	2-Пентеналь		0,860
— этил-	***CiHsO***	0,837 (17° C)	1-Пентен-3-ин (пирилен)		0,7401
Оксиранкарбоновая кислота, этиловый эфир	C5H803	1,085	2-Пентеновая кислота	**C H P**	0,9809
			1-Пентен-3-ол	**CsHiod**	0,8395
Октан	CsHis	0,8756	4-Пентен-1-ол	CsHioO	0,8457
Ортомуравьиная кислота, триметиловый эфир	**C4H10O3**	0,9676	4-Пентен-2-ол	C5H10O	0,8367
			Пентиламин	C5H13N	0,7561
Ортоугольная кислота, тетраэтиловый эфир		0,9186	трет-Пентиламин		0,7320
			Пентил нитрит		0,8958
Ортоуксусная кислота. триметиловый эфир	**Q H ^ A**	0,9438 (25° C)	1-Пентии	C5H8	0,6901
			2-Пентин	CbHs	0,7107
1,2-Пентадиен	***CbHs***	0,6926	1-Пентин, 5-хлор-	CБИ,Cl	0,968
1,4-Пентадиен-3-он	C6HЮ	0,8811	2-Пентиновая кислота	CjHeO,	0,978
1,3-Пентадиин	C5H4	0,7909	1-Пентин-3-ол	CsHgO	0,8859
Пентаметилендиамин	C5HX4N,	0,867 (25° C)	Пиперидин	**CbHuN**	0,8698
Пентан	C5H1,	0,6262	— 1-метил-	**QHUN**	0,8159
			— 1-иитрозо-	**C5H„NO**	1,0631

*Продолжение табл. 5.***3**

Название	Формула	Плотность, ю^ кг/м5
Пиразин		1,0254 (60= C)
Пиразол	c h n '	1,001 (99,8° C)
2-Пиразолин	CsHgNj	1,020 (17° C)
2Я-Пиран, 3,4-дигидро-	**СБНР**	0,9261
2Я-Пиран-2-он (а-пирон)	**C5H4O2**	1,1972
4Н-Пиран-4-он (•у-пирон)	C5H4O,	1,190
Пиран-2-он, тетрагидро-		1,0794
Пиридазин		1,111
2-Пиридиламин, W, iV-диметил-		1.0192
2-Пиридиламин, iV-метил-	CeHsN,	1,0707
Пиридин		0,9835
—2-ацетил-	**CSno**	1,0776 (15° C)
—2-бром-	CbH4BrN	1,6337
—2-винил-		0,9757
—2,3-диметил-		0,9453
—2-метил-		0,9443
—2-метокси-	C,H,NO	1,0457
— 1,2,3,6-тетрагидро-	CsHsN	0,9153
—2-хлор-	**CSH^C1N**	1,2029
—2-этил-	C,HsN	0,9304
Пиридин-4-карбальдегид (изоникотиновый альдегид)	**CEHSNO**	1,1339(25^0
Пиримидин		1,1293
Пиррад		0,9698
~ 1-ацетил-	QH,NO	1,044
— 2,4-диметил-		0,9208
—2-изопропил-	Ж	0,906 (25° C)
—2-метил-		0,9295
— i-пропил-	C^HuN	0,8833
— l-этил-	QH«N	0,9009
Пирролидин	QH9N	0,8586
— l-метил-		**0,8188**
— l-пропил-	**C,H**,5N	**0.8172**
— l-этил-	**CEHISN**	0,8263
2-Пирролидон	**C4H,NO**	1,120
— 1,5-диметил-	C,H„NO	1,0242
— l-метил-	C5H9NO	1,0328
3-Пирролин	C4H,N	0,9097
Пропан	C3Hв	0,5853 (-45° C)
—1-бром-	C3H,Bг	1,3537
- 2-бром-	**C3H,Bг**	**1,3140**
— l-виинлокси-	**CBH,,o**	**0,7680**
— 1,2-д1Щтоксн-		1,059
— l,l-дибром-	C3H«Bг,	1,982
—l,3-динод-	C3He1.	2,5755
—2,3-диметил (неопентан)	**C5H12**	0,6135
-1,1-дихлор-	**C3HeC1,**	1,1321
-1-иод-	C3H,1	1,7489
—2-метил-(изобутан)		0,551 (25° C)
— l-метокси-	C4H,oO	0,738
—1-нитро-	C3H,NO,	0,9955 (25°C)
-1,2,3-трибром-	C3H5BГ3	2,4209
-1,2,3-трихлор-	C3H5CI3	1,3889
-1-фтор.	C3H,P	0,7956
— l-хлор-	C3H,C1	0,8904
— i-**этоксп**-	**CsHi^O**	0,7386
Пропаналь (пропионовый альдегид)	**C3H6O**	0,8058
—, дпэтилацеталь-	**CйHxPг**	**0,8232**

Продол **я с** *ение табл. 5.***3**

Название	Формула	Плотносп. l0= кг/м»
—- , **оксим-**	C3H,ON	0,9258
— 2,-бром-	C3H5OBГ	1,592
— 2,3-Д11бром-	C3H4OBГ,	2,198 (16° C)
— 2,2-диметил-		0,7832
— 2,3-дихлор-	**C3H4OCl2**	1,40
— 2-метил-	QHgO	0,7904
— 2-оксо-	C3H4O.,	1,0455 (24° C)
— 2-хлор-	C3H5OCI	1,182 (15° C)
1,2-Пропандиол (пропиленгликоль)	C3HвO,	1,0361
1,2-Пропандиол, 3-меркапто- (тиоглицерин)	C3H«o,8	1,2455
1,3-Пропандиол, 2-метокси-	C4H10O3	**1,124 (25° C)**
1,3-Пропандиол, 2-хлор-	C3H,0,C1	1,3219
1,3-Пропандитиол		1,0783
Пропановая кислота (пропионовая кислота)	C3HeO,	0,993
—, ангидрид	C6HюO3	1,0110
—, бромангидрид	C3HaOBr	1,521 (16° C)
—, бутиловый эфир	C,Hi4o2	0,8754
—, изобутиловый эфир	QHMO**S**	0,8687
—, изопропиловый эфир	C eHi A	0,8660
—, метиловый эфир	C4H8O,	0,9150
—, нитрил	C3H5N	0,7818
—, пропиловый эфир		0,8809
—, фторангидрид-	C3H5OF	0,972 (15° C)
—, хлорангидрид-	C3H5OCI	1,0646
—, этиловый эфир	**CSH10O,**	0,9359
— 2-ацетокси-	C5H8O4	1,1758
— 2-бром-	C3H5O2BГ	1,70
— 2,2-дихлор-	C3H4o2C12	1,389 (23° C)
— 2-иод-	C3HьO,1	2,073
—3-меркапто-	C3H6O^3	1,218
— 2-метил-(изомасляная кислота)	**C4HA**	0,9682
— 2-оксо-(пировиноградная кислота)	C3H4o3	1,2272
3-Н-фтор-	C3H502F	1,1815
— 2-хлор-	C3H502C1	1,2585
1-Пропанол	QH^O	0,8035
2-Пропанол (изопропиловый спирт)	**CANGO**	0,7855
2-Пропанол, 1-амино-	QH^ON	0,9611
2-Пропанол, 1-бром-	C^HjOBr	1,5585 (30° C)
1-Пропанол, 2,3-дибром-	C3H6OBr^	2,0739
2-Пропанол, 2,2-диметил-	C5H12O	0,812
2-Пропанол, 1,3-диметокси-	**CьHxPз**	1,0085
1-Пропанол, 2,3-дихлор-	C3HeC1,	1,3506 (25° C)
2-Пропаиол, 2-метил-(трет-бутиловый спирт)	**c л o o**	0,7887
1-Пропанол, 2-нитро-	**CSHA^N**	1,1841 (25°C)
1-Пропанол, 2-хлор-	**CgHjOCl**	1.103
2-Пропанол, 1-хлор-	**C3H,OC)**	1,115
1-Пропаиол, 2-этокси-	CbHiP	0,9044
2-Пропанол, 1-этокси-	C5H120	0,9028
2-Пропанон (ацетон)	C3HeO	0,7899
—, азии		0,8389
—, гексахлор		1,7444 (12° C)
—, 1-гидрокси (ацетол)	C,HeOa.	1,0824
—, 1-хлор-	**CKOCl**	1,15
1-Пропансульфоновая кислота, хлорангидрид	C3H,0,8C1	1,2826 (15°C)

	Формула	
2-Пропансульфоновая кислота	C3H5O3S	1,187 (25° C) 0,8411
1-Пропантиол (пропилмеркаптан	CaH^S	0,8143 0,8339
2-Пропантиол (изопропилмеркаптан)	C3H^3	
1-Пропантиол, 2-метил- ([1!зобутилмеркаптан)	C4H10S	
2-Пропантиол, 2-метил- (трет-бутилмеркаптан)	C4Hi„S	
1,2,3-Пропантриол (глицерин)	C3HBO3	1,2613
Пропен (пропилен)		0,5193
1-Пропен, 3-азидо-		0,924 (25° C)
— 1-бром-(транс^	C3H5BГ	1,428
—2-бром-	C3H5BГ	1,362
— 3-бром-	gH.Bг	1,398
— гексафтор-		1,583 (-40° C)
— 1,2-дихлор-	C3H4Cl2	**1,1818**
— 3-иод-	C3H5I	1,8494
— 2-метил-(изобутилен)	C4H8	0,5942
— 3-метокси-	C4H8O	0,77 (11°C)
— 1-нитро-	C3H5O2N	1,065
— 1,2,3-трихлор-		1,414
— 1-хлор-(трɛшс)		0,9350
— 3-этокси-		0,7651
Пропеналь (акриловый альдегид)		0,8410
—, диацетат		1,0760
—, диэтилацеталь		0,8543 (15°C)
— 2-метил-		0,837
Пропеновая кислота (акриловая кислота)	C3H4O,	1,0511
—, аллиловый эфир		0,9441
—,бутиловый эфир		
—, изобутиловый эфир		o!8896
—, метиловый эфир		0,9535
—, нитрил		**0,8060**
—, хлорангидрид		1,1136
—,этиловый эфир		0,9234
— 2-метил-(метакриловая кислота)		1,0153
2-Пропен-1-ол (аллиловый спирт)		0,8540
—2-метил (металлиловый спирт)		0,8515
2-Пропен-1-тнол (аллилмеркаптан)		0,925 (23° C)
Пропиламин		1,1064
— *N,* Л'-диметил-		0,7173
— Л'-метил-		0,7574
— 3-метокси		0,7204 (17° C)
— 1,2,2-триметил		0,7668
—]-этил-		0,7487
Пропилгидразин		0,8406
Пропилендиамин		0,8584 (25° C)
Пропилизотиоцианат		0,9781 (16° C)
Пропилизоцианид		0,7599 (17° C)
Пропилнитрат		1,0538
Пропилнитрит		0,935
Пронии		0,7062 (—50° C)
— 3-бром-		1,579
— 3-иод-		2,0177 (0°C)
— 3-метокси-	C4H«0	
— 3-хлор-	C3H3C!	
— 1-этокси-	*C,HsO*	
Пропиналь (пропиоловый альдегид)	C3H,0	
Пропиновая кислота (пропаргиловая кислота)	C3H,0,	
2-Пропин-]-ол (пропаргиловый спирт)	C3H4O	
Силанол, триметил-		
Тетраэтилгерманий		
Тетраэтилсвинец		
1,4-Тиазин, тетрагидро-		
Тиазол	C3H3NS	
Тиетан	C3H,8	
Тииран (этиленсульфид)		
— 2,2-дпметил-		
— метил-		
— фенил-		
— этил-		
Тиопиран-2-он, тетрагидро-		
Тиоуксусная кислота	C2H4OS	
Тиофен	C4H4S	
— 2-ацетил-	QH^OS	
— 2-бром-	QHsBrS	
— 2-гидрокси-	C4H4OS	
— 2,5-дибром-		
— 2,3-диметил-		
—2-иод-		
— 2-метил-		
— тетрагидро-		
— тетрахлор-		
— 2-хлор-	CeHgClS	
— 2-этил-	QH'gS	
Тиофен-1,1-диоксид, тетрагидро-	C4H,o,s	
2-Тиофенкарбальдегид	C5H40S	
Тиофен ол	CeHeS	
— 2-метил-		
— 4-метокси-		
— 2-хлор-		
1,2,3-Триазол		
Триметилалюминий	C3H9A1	
Триметиламин		
Триметиларсин		
Триметилборат		
Триметилендиамин		
Триметилстибин		
Триметилфосфат		
Триметилфосфит		
Триэтилалюминий		
Триэтиламии		
Триэтнларсин		
Триэтилборат		
Триэтилстибии		
Триэтилфосфат		
Триэтилфосфин		
Триэтил фосфит		
Угольная кислота бензиловый эфир, хлорангидрид		
бутиловый эфир хлорангидрид	CsHgOaCl	

Продолжение табл. 5.3

—, диметиловый эфир		1,0706
дипропиловый эфир		0,9435
дихлорангидрид (фосген)	COCla	1,381
—,диэтиловый эфир		0,9764
—, изобутиловый эфир, хлорангидрид	SHXC.	1,0426
—, изопентиловый эфир, хлорангидрид	C„HuOCl	1,049
—, изопропиловый эфир, хлорангидрид	C,H,O₃C1	1,0777
—, метиловый эфир, хлорангидрид	CrH₃O,C1	1,2298
—, пропиловый эфир, хлорангидрид	C,H,0,C1	1,0902
Уксусная кислота	C2H402	1,0492
—, аллиловый эфир		0,9277
амид,		0,998й (25° C)
—,ангидрид		1,0820
бромангидрид		1,6625 (16° C)
—, бутиловый эфир	с,н 0,	0,8825
—, виниловый эфир		0,9342
—, изобутиловый эфир		0,8710
—, изопропениловый эфир		0,9090
—, изопропиловый эфир		0,8718
—, иодангидрид		2,0674
—, метиловый эфир		0,933
—, нитрил		0,7843
—, пентиловый эфир		0,8745
—, пропиловый эфир		0,8867
—, фторангидрид	CHJOF	1,002 (15° C)
—, хлорангидрид	QHjOCl	1,1051
—, хлорметиловый эфир этиловый эфир (этилацетат)	C₃H,0;,a	1,194
		0,9003
— амино- (глицин)	C ^ O j N	1,1607
— бром-		1,9335 (50° C)
— дибром-		1,0921
— дифтор-		1,5255
— дихлор-		1,5634
— меркапто-		1,3253
— метокси-		1,1768
— трифтор-		1,5331 (0°C)
— трихлор-	г но П»	1,62
-фтор-	C2H3O2F	1^3693 (36° C)
— хлор-		1,4034 (40° C)
-этокси-		1,1021
Фенилгидразин	CeHgNa	1,0986
Фенилзотиоцианат	C,H5NS	1,1303
Фенилзоцианат (карбанил)	QHsNO	1,0946
Фенол (карболовая кислота)	C6HeO	1,0576
—4-меркапто-	CgH^OS	1,1285 (25° C)
-2-мегил-	с X о	1,0273
—2-нитро-	C6H5N03	1,2942 (40° C)
—2-хлор-		1,2634
Формальдегид (муравьиный альдегид)		0,815 (- 2 0 ^ 0
Фуран	C4H40	0,9378
—2-ацетил-		1,098 (20° C)
—2-бром-		1,650
—2-бромметил-	C5H50BГ	1,560

Продолжение табл. 5.3

Назеа,,,,е	Формула	Плотность, Щ» кг/м*
— 2,5-дибром	CiHjOBr»	2,27
— 2,5-диметил	CeHgO	0,90
— 2,5-дихлор	C4H20C12	1,371 (25° C)
— 2-иод-	C4H3IO	2,024
— 2-метил-	C в H р	0,9132
— 2-метокси-	CвHeOa	1,0646 (25° C)
— тетрагидро-		0,8886
— 2-хлор-	C4H3OCI	1,1923
— 2-этил-	CвH«0	0,9013
— 2-этокси-	C6Hp,	0,9849 (23° C)
2-Фуранкарбальдегид	C5H40,	1,1594
Фурфуриламин	CbH^ON	1,0533
Циклобутан		0,720 (5° C)
— метил-		0,688
— этил-	C5H12	0,728
Циклобутанкарбоновая кислота	CьH^O,	1,057
Циклобутанол	C4H80	0,9226 (15° C)
Циклобутанон		0,9548 (0°C)
Циклобутен	Й н Г	0,733 (0°C)
1,3-Циклогексадиен	CвHв	0,8406
Циклогексан	CeHia	0,7786
— бром-	CeHuBr	1,3360
— i ,2-дибром-(транс)	CeHюBr,	1,7759
— 1,2-дихлор-(транс)		1,2021
— иод	CбHц!	0,7694
— метил-		0,8074
— метилен-		0,8752
— метокси-		1,0610
— нитро-	cSliNOa	0,7794
— фтор-	C	0,9279
- хлор-	CeHxiCI	0,9891
— этил-		0,7880
1,2-Циклогександион	CeHвб,	1,1187
Циклогексанкарбальдегид		0,9235 (25° C)
Циклогексанкарбоновая кислота		1,0274 (30° C)
Циклогексанол	CeHiP	0,9624
—1-метил-	C,Hi40	0,9194
— 2-хлор-(транс)	CeHuOCI	1,1461 (16° C)
Циклогексанон	CбHюO	0,9455
Циклогексантиол		0,9786
Циклогексен	CBHJ	0,8102
I-Циклогексенкарбальдегид	c,H„o	0,9694
1-Циклогексен-1- карбоновая кислота	C,Hi,02	1,109
2-Циклогексен-1-ол	CбHюO	0,9923 (15° C)
2-Циклогексен-1-он	CeH^O	0,9931
Циклогексиламин	CeHisN	0,8671
Циклогексилизоцианат	CHuON	0,9852
Циклопентан	C,Hi4	0,8098
1,2-Циклогептандион		1,0607 (22° C)
Циклогептанол	C,Hi40	0,9478
Циклогептанон	C,Hx,0	0,9491
1,3,5-Циклогептатриен		0,8875
2,4,6- Циклогептатр иенок	c,H«o	1,095 (22°C)
Циклогептен		0,8255
Циклопентадиен		0,8021
— гексахлор	CeCle	1,7119
Циклопентан	C5HИ	0,7454
— ацетил-		0,9172

—бром-		1,3873
— метил-		0,7486
- х л о р -		1,0053
— этил-		0,7665
Циклопеитан карбальде-гид		0,9371
Циклопентаикарбоновая кислота		1,0527
Циклопеитанол		0,9478
Циклопентанон		0,9450
Циклопеитен		0,7720
Циклопропан		0,6769 (—30° С)
— ацетил-		0,8984
— винил-		0,7160
— 1,1-ДНметил-		0,6589
— метил-		0,6912 (—20° С)
Циклопропаикарбоновая кислота		1,0889
—, метиловый эфир		0,9972
—, нитрил		0,8946
—, хлорангидрид		1,1518
—, этиловый эфир		0,9638
Щавелевая кислота		1,653
Этан		0,509 (—60° С)
— азидо-		0,8765 (25° С)
— бром-		1,4604
— 1-бром-2-фтор		1,7044 (25° С)
— 1-бром-2-хлор		1,7392
— гексабром-		2,823
—гексафтор-		1,590 (-78° С)
— гексахлор-		2,091
— 1,1-дибром-(этилиден-бромид)		2,0555
— 1,2-дибром (бромистый этилеи)		2,1792
— 1,1-дииод-(этилнден-иодид)		2,84 (0°С)
— 1,2-дииод-		3,325
— 1,2-диметокси-		0,86285
— 1,1-ДИнитро-		1,3503 (24° С)
—1,1-Дифтор-(этилиден-фторид)		0,95
— 1,2-дифтор-		1,024 (10° С)
— 1, l-ДИХлор-(этилиден-хлорид)		1,1757
~ 1,2-дихлор-(хлористый этилен)	$C_2H_4Cl_2$	1,2351
- и о д -		1,9358
— метокси-		0,7252 (0°С)
— нитро-		1,0448 (25°С)
— пентабром-		3,312
— пентахлор-		1,6796
— 1,1,1.2-тетрабром-.		2,8748
— 1,1,1,2-тетрахлор-		1,54064
— 1,1,2-трибром-		2,6211
~ 1,1,1-трифтор-		3,78-10-3
—1,1,1-трифтор-2,2,2-трихлор-		1,5790
— 1,1 ,l-трихлор-(метил-^хлороформ)	$C_2H_3Cl_3$	1,3390
		0,7182
— 1-фтор-2-хлор-		1,1747
—хлор-		0,8978
Этандиаль (глиоксаль)		1.14
1,2-Этандиол (этилен-гликоль)		
Этанол (этиловый спирт)		
— 2-азидо-		
— 2-амиио- (этаноламин)		
— 2-бром		
— 2,2-дихлор-		
— 2-иод-		
— 2-меркапто-		
— 2-метокси-		
— 2-нитро-		
— 2,2-оксидн (диэтилен. гликоль)		
— 2,2,2-трифтор-		
— 2-фтор-		
— 2-хлор-		
— 2-этокси-		
Этаисульфоиовая кислота		
Этантиол (этилмеркаптан)		
Этиламин		
Этилгидразин		
Л/-Этилгидроксиламин		
0-Этилгидроксиламин		
Этилгидропероксид		
Этилгипохлорит		
Этилен		
— бром-		
— 1,1-дихлор-		
— иод-		
— метокси-		
— тетраиод-		
— тетрафтор-		
— тетрахлор-		
— трибром-		
— трихлор-		
— фтор-		
— хлор-		
— этокси-		
Этилендиамин		
Этилизотиоцианат		
Этилизоцианат		
Этилнзоцианид		
Этил нитрат		
Этилиитрит		
Этии (ацетилен)		
— бром-		
— метокси-		
— хлор-		
— этокси-		

Продолжение табл. 5.4

5.5. СПЛАВЫ, МИНЕРАЛЫ, ДЕРЕВО И ДРУГИЕ ТВЕРДЫЕ ВЕЩЕСТВА

	Плотность, 10^{-3} кг/м^3
Дерево **(сухое)**	
атласное	0,95
бальза (пробковое)	0,11—0,14

Продолжение табл. 5.3 *Продолжение табл. 5.3*

Название	Плотность, IQS кг/ы'	Название	Плотность. 10- кг/м9
бамбук	0,31—0,40	кальцит	2,6-2,8
бук	0,70—0,90	кварц:	
береза	0,51—0,77	плавленый	2,65
вишня	0,70—0,90	прозрачный	2,21
гикори	0,60—0,93	непрозрачный	2,07
груша	0,61—0,73	кокс	1,0-1,7
дуб	0,60—0,90	копал	1,04—1,14
ель канадская	0,48—0,70	коруид	3,9—4,0
железное (бакаут)	1,17—1,33	кремень	2,63
ива	0,40-0,60	магнетит	4,9—5,2
камедное	1,00	малахит	3,7-4,1
кедр	0,49-0,57	мел	1,8-2,6
кизил	0,76	мергель	2,3-2,5
клен	0,62—0,75	мрамор	2,6-2,84
красное (Гондурас)	0,66	наждак	4,0
красное (Испания)	0,85	опал	2,2
лига	0,32—0,59	пемза	0,4-0,9
лиственница	0,67	песчаник	1,9—2,65
можжевельник	0,56	пирит	4,95—5,1
ольха	0,42—0,68	полевой шпат	2,55—2,75
орех	0,64—0,70	порфир	2,6—2,9
осина	0,50	роговая обманка	2,9—3,2
остролист	0,76	серпантин	2,5-2,65
пихта	0,40	сланец	**2,6-3,3**
платан	0,40—0,60	слюда:	
рожковое	0,67—0,71	белая	2,76—3,00
самшит	0,95—1,16	обычная	2,6—3,2
сандаловое	0,91	черная	2,7—3,1
слива	0,66-0,78	соль каменная	2,18
сосна:		тальк	2,7-2,8
белая	0,50-0,55	топаз	3,5-3,6
обыкновенная	0,37-0,60	торф, сухой	0,5
тик:		ториаиит *iR)*	9,32-9,33
индийский	0,66-0,88	торит *(R)*	4,5—5,4
африканский	0,98	трогерит *(R)*	3,3
тополь	0,35—0,5	турмалин	3,0-3,2
эбеновое (черное)	1,11—1,33	туф лавовый	0,75-1,4
ЭЛЬМ	0,54—0,60	уголь:	
яблоня	0,66—0,84	антрацит	1,4—1,8
ясень	0,65—0,85	битуминозный	1,2—1,5
Минералы		уранит *(R)*	6,5—9,7
		ураиит:	
агат	2,5—2,8	кальциевый *(R)*	3,05—3,19
алебастр:		медный *{R)*	3,22-3,60
карбонатный	**2,69—2,78**	**флюорит**	3,18
сульфатный	2,26-2,32		
алмаз	3,01-3,52	**Сплавы**	
альбит	2,62—2,65		
андезит-	2,2—2,7	алюмель	8,48
анортит	2,74-2,76	бронза	7,5—9,1
асбест	2,1—2,8	вуда	9,7
асбестовый сланец	1,8	дюралюминий	2,6-2,9
базальт	2,6-3,25	инвар	7,9
берилл	2,69-2,70	константан	8,88
бештаунит	2,4—2,5	копель	8,9
газовый уголь	1,88	куниаль	8,5—8,7
галенит	7,3—7,6	латунь	8,2-8,85
гематит	4,9—5,3	магналиум	2,50
гипс	2,31—2,33	маиганин	8,4
глина	1,6—2,9	мельхиор	8,9
гранат	3,15—4,3	монель-металл	8,8
гранит	2,34—2,76	нейзильбер	8,7—8,82
доломит	2,84	никелин	8,8
известняк	2,68—2,76	нихром	8,4
известь гашеная	1,15-1,25	платино-иридиевый	21,62

Продолжение табл. 5.3

	Плотность, 10' кг/м®
Сталь:	
нелегированиая, низко- Iсред-нелегированиая	7,77—7,85
нержавеющая, жаропрочная, жаростойкая	7,9—8,2
ферронихром	8,4
хромель	8,7
чугун:	
белый	7,6—7,8
серый	7,0—7,2
электрон	
Другие вещества	
асфальт	**1,1—2,8**
бетон	1,8—2,5
битум	~1
бумага	0,7-1,15
вазелин	0,8-0,9
воск пчелиный	0,96
гуммиарабик	1,3—1,4
гуммигут	
деготь, смола	1,02
желатин	1,27
каменное литье	2,9—2,95
камень мыльный	2,6—2,8
	0,99
каиифоль	1,07
картой	0,69
каучук растительный	0,91
керамика	2,1-2,3
киноварь	8,12
кирпич:	
обыкновенный	1,4—1,6
огнеупорный	1,7—2,0
кожа сухая	0,86
кость	1,7—2,0
кость слоновая	1,83-1,92
крахмал	1,5
лед (0°С)	0,917
линолеум	1,18
охра	3,5
парафин	0,87—0,91
песок:	
сухой	1,2-1,6
сырой	1,9—2,1
пирекс	2,25
почва	1,3—2,0
пробка	0,22—0,26
резина:	
мягкая	1,1
твердая	1,19
чистая	0,91—0,93
сажа	1,8-1,9
сахар	1,59
снталл	2,5
смола естественная	1,0—1,1
снег (рыхлый)	0,12
соль поваренная	2,2
стеарин	1,0
стекло:	
боросйлнкатное термостойкое	2,2-2,4
кварцевое	2,2
обыкновенное	2,4—2,8
флинтглас	**3,9-5,9**
сургуч	**1,8**
сурик свинцовый	**8,0—9,1**

Продолжение табл. 5.3

Название	Плотность, 10- кг/м'
уголь древесный:	
дубовый	0,57
сосновый	0,28—0,44
фарфор	2,3—2,5
фаянс	1,9—1,96
фибра красная	1,45
целлулоид	1,4
цемент затвердевший	2,6-3,2
шамот	1,85—2,2
шифер	2,7—2,8
шлак доменный	2,6-3,0
шлакоситалл:	
белый	1,6—2,77
серый	2,6—2,75
эбонит	1,15
янтарь	1,1

5.6. ПЛАСТМАССЫ [8]

Название	Плотность, 10-кг/м-
Акрилнитрилбутадненстирольный пластик	1,03-1,05
Акриловинильная масса	1,13
Аминопласт	1,4—2,0
Ангел ИТ	1,7—1,95
Анид	1,14-1,16
Анид стеклоиаполиенный	1,4
Антифрикционный пластик	1,74—1,80
Асботекстолит электротехнический листовой	1,5—1,7
Винипласт:	
листовой	1,38—1,43
ударопрочный	1,40—1,45
Волокнит	
Гетинакс электротехнический листовой	1,28—1,45
Дакрнл	1,19
Дифсан	1,32
Древеснослоистый пластик типа ДСП	1,25-1,30
Изодин	1,35—1,45
Капрслит	1,2
Капролон	1,15—1,16
Капрои	1,1-1,2
Ниплон	1,3—1,34
Пенопласт К-40	0,2—0,4
Пентопласт	1,32—1,40
Полнакрилат	1,2
Полиамид	1,02-1,13
Полиамид стеклоиаполненный	1,35—1,38
Поливинилхлорид:	
суспензионный	1,34-1,its
эмульсионный	0,5—0,63
Поливнилхлоридный пенопласт	0,1—0,3
Поликарбонат (дифлон)	1,2
Полиметилметакрилат:	
литьевой	**1,18—1,2**
суспензионный	1,19
Полипропилен	0,9—0,92
Полистирол:	
общего назначения	1,05—1,10
ударопрочный	1,06

Продолжение табл. 5.3

	Плотность, 10^ кг/м"
Полистирольный пластик	1,2
Полисульфон	1,25
Полиуретан	1,21
Полиэтилен:	
высокого давления	0,90—0,94
низкого давления	0,95-0,96
Полиэтиленпирефгалат (лавсаи)	1,32—1,53
Ретинакс	2,4—2,7
Смола:	
полиамидная	1,11—1,12
полиэпоксидная	1,1—1,2
полиэфирная	1,08—1,3
эпоксидиановая	1,2—1,3
эпоксидная	1,13—1,2
Сополимер:	
стирола	1,12—1,14
этилена с пропиленом	0,90—0,96
этилена с винилацетатом	0,92—0,96
Стекловолокнит	1.7—1,9
Стекловолокнистый анизотропный материал	1.8—2,0
Стекло органическое:	
конструкционное	1,18—1,19
техническое	1, 18
Стеклопластик	1,65—1,78
Стеклотекстолит:	
конструкционный	1,77—1,9
электротехнический	1,6—1,9
Текстолит:	
графитированный	1,3—1,4
конструкционный	1.3—1,4
электротехнический листовой	1,25—1,45
Фенилон	1,35
ФенолИТ	1,5—1,6
Фенольная прессовочная масса	1.4—1,85
фенопласт:	
влагохимостойкий	1.5—1,6
жаростойкий	1,75-1,90
литьевой	1,4—1,5
общего назначения	1,40-1,45
ударопрочный	1,45
электроизоляционн ый	1,85
Флан	1,2—2,6
Фторопласт	1,65—1,80; 2,02—2,23
Фуранит	1,60—1,85
Этрол:	
ацетопропионатцеллюлозный	1,16—1,25
ацетилцеллюлозный	1,27—1,34
нитроцеллюлозный	1,8-2,0

5.7. ЖИДКОСТИ [5, 17]

Название	Плотность, 10= кг/м-
Азотная кислота (100%-ная)	1,50
Ацетон	0,80
Бензин	0,7—0,8
Бензол	0,88
Глицерин	1,26
Дизельное топливо	0,86
Каменноугольная смола	1,05—1,25

Продолжение табл. 5.3

	Плотность. 10® кг/м"
Керосин	0,81—0,84
Креозот	1,04-1,10
Мазут	0,91—0,99
Масло:	
касторовое	0,96
растительное	0,91—0,97
трансформаторное	0,84—0,89
Медный купорос:	
10%-ный	1,107
20%-ный	1,230
Молоко	1,03
Нефть	0,73—0,94
Олифа	0,93-0,95
Раствор поваренной соли в воде:	
10%-ный	1,071
20%-ный	1,148
Серная кислота (концеитрированная)	1,83
Скипидар	0,87
Соляная кислота (20%-ная)	1,10
Спирт этиловый	0,79
Стекло растворимое (ждк.)	1,35—1,53
Эфир	0,72

5.8. РТУТЬ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ [13]

t, °С	Плотность, 10® кг/м®	*t*, °С	Плотность, 10® кг/м-
0	13,59503	220	13.06431
10	13,57039	230	13,04048
20	13,54583	240	13,01665
30	13,52133	250	12,99282
40	13,49689	260	12,96898
50	13,47251	270	12,94514
60	13,44819	280	12,92127
70	13,42393	290	12,89739
80	13,39971	300	12,87350
90	13,37554	310	12,8496
100	13,35142	320	12,8256
ПО	13,32734	330	12,8016
120	13,30330	340	12,7776
130	13,27929	350	12,7536
140	13,25531	360	12,7294
150	13,23137	370	12,7053
160	13,20745	380'	12,6811
170	13,18356	390	12,6569
180	13,15968	400	12,6326
190	13,13582	410	12,6082
200	13,11197	420	12,5838
210	13,08814	430	12,5593

Продолжение табл. 5.8

t, ^с		*t*, °С	Плотность, 108 кг/м-
440	12,5348	630	12,051
450	12,5101	640	12,025
460	12,4854	650	11,998
470	12,4607	660	11,972
480	12,4358	670	11,945
490	12,4109	680	11,918
500	12,386	690	11,891
510	12,361	700	11,863
520	12,336	710	11,836
530	12,310	720	11,809
540	12,285	730	11,781
550	12,259	740	11,753
560	12,234	750	11,725
570	12,208	760	11,697
580	12,182	770	11,669
590	12,156	780	11,641
600	12,130	790	11,612
610	12,104	800	**11,584**
620	12,078		

5.9. ДИСТИЛЛИРОВАННАЯ ВОДА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ [6]

t.	Плотность, 10= кг/м=	*t.*	Плотность, 10= кг/м
0	0,999841		
1	0,999900	14	0,999244
2	0,999941	15	0,999099
3	0,999965	16	0,998943
4	0,999973	17	0,998775
5	0,999965	18	0,998596
6	0,999941	19	0,998406
7	0,999909	20	0,998205
8	0,999849	21	0,997994
9	0,999782	22	0,997772
10	0,999701	23	0,997540
11	0,999606	24	0,997299
12	0,999498	25	0,997047

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moses** J. The Practicing Scientist's Handbook. A Guide for Pliysical and Terrestrial Scientists and Engineers. N. Y.- Van Nostrand Reinhold Company. 1978.

2. Свойства элементов: Справочник. Ч. 1. Физические свойства/Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия.

3. Свойства неорганических соединений: Справочник/ А. И. Ефимов и др. Л.: Химия. 1983.

4. **Nuclear** Wallet Cards/Ed. by V. S. Shirleg, C. M. Ledered. Produced by the Isotopes Project, Lawrence Berkeliy Laboratory, on Behalf of the U. S. Nuclear Data Network, 1979.

5. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. — 2-е изд. Л.: Химия. 1978.

6. **Гордон** А., **Форд** Р. **СПУТНИК** химика. Физико-химические свойства, методики, библиография: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.

7. Свойства органических соединений: Справочник/ Под ред. А. А. Потехина. Л.: Химия. 1984.

8. **Каицельсон М. Ю., Бадаев Г. А.** Пластические массы. Свойства и применение: Справочник. — **3-е изд. Л.:** Химия. 1978.

9. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. — 3-е изд. М.: Металлургия 1974.

10. Кей **Д.,** Лэби **Т.** Справочник физика-экспериментатора: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.

11. **Кей** Д., Лэби **Т.** Таблицы физических и химических постоянных: Пер. с англ./Под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматгиз. 1962.

12. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука. 1972.

13. Кухлинг, Хорст. Справочник по физике: Пер. с англ. М.: Мир. 1982.

14. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат. 1968.

15. **Тепловые** и атомные электрические станции: Справочник/Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М.: Эиергоиздат. 1982.

16. Справочник химика. Основные свойства неорганических и органических соединений/Под общ. ред. Б. П Никольского. 3-е изд. Л.: Химия, 1971. Т. 2.

17. **Краткий** справочник химика/Сост. В. И. Перельман. 6-е изд. М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1963.

ГЛАВА 6

ТРЕНИЕ

И. и. Карасик

6.1. ВВЕДЕНИЕ

Основные понятия, относящиеся к трению, регламентированы ГОСТ 23.002—78 [3]. Внешнее трение (трение) — явление сопротивления относительному перемещению, возникающего между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии. Трение покоя наблюдается при предварительных микросмещеииях до перехода к относительному движению на макроуровне, после чего (при увеличении сдвигающего усилия) наблюдается трение движения. При трении скольжения скорости тел в точке касания различны по модулю и направлению или по модулю или направлению в отличие от трения качения, когда эти скорости одинаковы и по модулю, и по направлению.

Основной характеристикой трения является сила трения—сила сопротивления при относительном перемещении одного тела на поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между телами. При этом различают наибольшую силу трения покоя в пределах предварительных микросмещений (обычно называемую просто силой трения покоя или силой сцепления) и силу трения движения, а также соответственно коэффициент сцепления и коэффициент трения *f* как отношение указанных сил трения к нормальной относительно поверхностей трения силе (нагрузке), прижимающей тела друг к другу.

В общем случае сила трения движения

где V — скорость относительного перемещения взаимнотрущихся тел; d/l/di — мощность фрикционных потерь, связанных с механическими (деформирование, адгезионное взаимодействие), физическими (адсорбция, звуковые, электромагнитные и др.), химическими (хемосорбция, химическое модифицирование поверхностного слоя) диссипативными процессами *fA* — работа трения, т е. диссипируемая энергия).

При обычных лабораторных условиях в инактивных средах и малой скорости скольжения, а также при трении качения решающее значение имеют компоненты диссипации, связанные с механическим взаимодействием в зоне трения.

Сила трения представляет собой результат распределенных по времени и по малым дискретным площадкам области фактического контакта актов взаимодействия различного вида:

непосредственный контакт материалов трущихся тел в исходном состоянии;

контакт через жидкостные масляные слои (гидродинамическая и гидростатическая смазка);

контакт через адсорбированные и хемосорбированные из окружающей среды и смазочного материала вещества (в частности, через граничные слои смазочного материала, частицы пыли и др.);

контакт через вторичные (образующиеся в процессе трения) структуры в поверхностных слоях трущихся тел.

Вклад этих взаимосвязанных компонент в общую силу трения различен при разной нагрузке *P* и скорости скольжения *v*, вследствие чего коэффициент трения движения в общем случае является функцией Р и о, внешних условий трения и смазки (в том числе условий теплоотвода), формы и размера трущихся тел.

При постоянных значениях указанных параметров и внешних условий после достаточно длительного приработочного периода устанавливаются специфическая для данного комплекса параметров микрогеометрия поверхностей трущихся тел, состав и структура поверхностных слоев, значения силы и коэффициента трения.

В приработочном периоде, как правило, снижается относительная доля пластического и увеличивается доля упругого деформирования на микроконтактах, повышается контакт через защитные слои смазочного материала и вторичные структуры и снижается непосредственный контакт, что в целом приводит к снижению сил трения.

Экспериментальные значения f, в строгом смысле, относятся только к конкретным условиям испытаний и для других условий могут быть использованы лишь как ориентировочные. Имеющиеся в литературе данные, представляющие несомненный практический интерес, относятся к большому многообразию различных нестандартных условий испытаний.

При пользовании таблицами следует учитывать, что от условий испытаний в меньшей степени зависят сравнительные ряды значений f или количественные соотношения между значениями *f* для разных материалов.

При трении в вакууме вследствие затрудненного образования защитных адсорбционных слоев и связанного с этим увеличения адгезионного взаимодействия наблюдается, как правило, более сильное трение. В приработочном периоде стабилизация f происходит при более высоком значении, чем начальное, и завершается после изнашивания поверхностных структур, сформированных в процессе предшествовавшей трению обработки поверхностей.

Повышение *v* в общем случае проявляется в изменении f вследствие изменения реологических свойств материалов в зоне трения и фрикционного разогрева, а последний влияет на f, так как меняются соотношение между адсорбционными и десорбционными процессами и твердость.

Материалы и сопряжения материалов условно разделяют на антифрикционные (/=0,15-^0,12 без смазки, /=0,1н-0,05 при смазке), используемые в опорах скольжения, и фрикционные (/=0,3^-0,35, реже ***f=0,5~0,G),*** используемые в сцепных фрикционных устройствах (тормоза, муфты, передачи трением).

Чтобы оценка относилась к материалам трущихся сопряжений, в исходном контролируемом состоянии экспериментальное определение f стремятся осуществлять в условиях однородного по поверхности трения контакта (равномерное на макроуровне распределение давления), при постоянных расчетной площади поверхности трения, скорости скольжения (не приводящей к ощутимому нагреву), некоторых характерных значениях давления (например, при давлении, равном твердости или определенной доли твердости).

Переесчет к другим условиям производится на основе расчетных формул, учитывающих реальное контактное давление.

Значение коэффициента трения скольжения *f* определяется суммой адгезионной h и деформационной /д составляющих, т. е. i=fB+fs..

Последние, обусловленные потерями повторного передеформирования тонких поверхностных слоев, при трении скольжения имеют существенное значение для весьма шероховатых поверхностей и полимерных материалов (табл. 6.1). Соотношение между адгезионной и деформационной составляющими для металлов таково, что при погрешности порядка 1% значением /д можно пренебречь.

Прочность адгезионной связи определяется из выражения [4]

$$= To + PP/-.$$

где рг — фактическое давление, представляющее собой частное от деления нагрузки Р на суммарную площадь пятен фактического дискретного фрикционного контакта, воспринимающих нагрузку (с учетом микрошероховатости, волнистости и макроотклонений поверхности от гео-

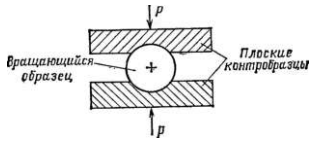


Рис. 6.1. Геометрия расположения образцов при стандартном методе определения То и 6

метрической формы); То, Р — параметры, характеризующие свойства материала поверхностных слоев.

На основе этой зависимости

Стандартный метод [4] экспериментального определения параметров То и Р основан (рис. 6.1) на: 1) вдавливании образца сферической формы, изготовленного из более твердого материала, в направлении нормали к поверхности плоского контробразца, изготовленного из менее твердого материала, с силой, вызывающей пластическую деформацию последнего; 2) приведении образца во вращение относительно оси, направленной по нормали к поверхности контробразца; 3) измерении моментов, развиваемых силами трения в контакте образца и контробразца, разгружении образцов и измерении размеров отпечатков на контробразце и 4) повторении испытаний при нагрузке на два порядка меньше. При этом считается, что фактическая поверхность контакта равна сферической контурной поверхности зоны вдавливания.

В табл. 6.2 кроме То и р представлены значения fan коэффициента трения при фактическом давлении, соответствующем твердости (^7т=НВ для образца из менее твердого материала испытываемого сочетания).

Фактическое давление ***рг*** зависит от механических свойств материала в приповерхностном слое и микрогеометрии поверхности. Данными табл. 6.2 можно пользоваться для сравнения параметров режима трения материалов при одинаковых значениях фактического давления. При очень малых давлениях сравнение прочности адгезионной связи производят по значениям То при высоких давлениях, близких к НВ, коэффициент трения оценивают по /ап, при больших ***fr*** И МаЛЫХ То по р.

Степень зависимости коэффициента трения от фактического давления оценивают по То и р

Коэффициент трения качения /к, как и трения скольжения и, определяется суммой адгезионной (f„a) и деформационной (***Up***) составляющих, Адгезионная составляющая при трении качения без проскальзывания связана с повторным в процессе трения разрывом адгезионных связей в направлении их действия.

Деформационная составляющая fиг^ при трении качения:

для сферы радиусом г, катящейся по плоскости,

$$/\text{ип} = \frac{}{} = c;$$

для цилиндра радиусом г, катящегося по плоскости.

где *а* — радиус площадки контакта (для сферы) и длина площадки в направлении движения (для цилиндра), рассчитанные по формуле Герца; с — коэффициент гистерезисных (деформационных) потерь, характеризующий внутреннее трение в приповерхностных слоях материала.

Для трения качения большее влияние деформационных (гистерезисных) потерь проявляется у более нагруженных тел, материалов с меньшим модулем упругости, меньшей твердостью (например, у оргстекла). При этом наблюдаются большие значения /„ по сравнению с материалами, у которых преобладает адгезионная составляющая (например, у стекла). У материалов, занимающих промежуточное положение (например, сталь, медь и др.), существен вклад обеих компонент.

6.2. АДГЕЗИОННАЯ СВЯЗЬ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ (табл. 6.1, 6.2)

Таблица 6. 1. Соотношение между адгезионной F^ и деформационной /д составляющими при трении скольжения

Материал						
fJh	0,2 - 1,0	1—2	2 - 9	4—9	2 - 3	< 100

Таблица 6. 2. Сдвиговая прочность адгезионной связи различных мат^налов при трении по стали [6]

.Материал	НВ, 10-Па	fa	t„, 10' Па	
		Металлы		
Алюминий	23	0,124	3,00	0,043
Бериллий	–	–	0.45	0,250
Ванадий	110,0	0,103	–	
Железо (армко)	130,0	0,097		
	65,0	0,160		
Висмут	7,70	0,175	0,454	0,116
Вольфрам	285	0,082		
Индий	0,80	0,20	0,107	0,066
Кадмий	23,0	0,096	0,943	0,055
Кобальт	130,0	0,092		
Магний	44,0	0,082	8,00	0,020
Молибден	186,0	0,095	2,79	0,080
	110,0	0,105	1,87	0,088
Медь	85,0	0,10	1,70	
	52,0	0,115	1,82	0,080
	28,5	0,139	1,68	
Никель	180,0	0,095	3,48	
	105,0	0,130	1,47	0,116
	70,0	0,123	0,49	
Ниобий	32,0	0,142	0,896	0,114
Олово	4,40	0,170	0,449	0,068
Платина	–	–	9,50	0,10
Рений	105	0,095		
Свинец	3,3	0,140	0,274	0,057
Серебро	55	0,096	0,77	0,081
	–	0,096	1,00	0,080
Сурьма	27,0	0,127	0,73	0,100
Тантал	78,0	0,115	2,42	0,084
Титан	190	0,085	2,90	0,080
	128	0,10	2,82	0,078
Хром	200	0,095		
	100	0,135	1,50	0,120
Цинк	33,0	0,088	–	–
Цирконий	74,0	0,121	–	–
		Подшипниковые сплавы		
БН	25	0,102	—	—
Б83	24	0,150		
АСС-6-5			1,0	0,065
А-20	–		1,6	0,050
Бронза бериллиевая	150	0,095	–	–
А-9	–	–	0,75	0,12
ЦАМ	–	–	0,50	0,05
Бр. Б2	–	0,095	2,45	0,085
Бр. АЖ Мц 10-3-1,5	–	0,120	2,00	0.100

Продолжение табл. 6.2

Материал	$\tau_{в}$ 10' Па	'а	10' Па	
Пластмассы				
Винипласт светлый	12,0	0,091	0,372	0,06
Капролои	13,0	0,065	0,15—0,195	0,05
Капрон технический	7,0	0,063	0,161	0,04
Полиэтилен ПЭВД	2,0	0,080	0,044	0,058
	2,6	0,090	0,130	0,040
Полиэтилен ПЭНД	3,8	0,080	0,114	0,050
Полипропилен	3,70	0,380	0,011	0,035
Поликапроамид	7,50	0,088	–	–
Полиамид 68П	16,0	0,085	–	–
Полиметил метакрилат	–	0,220	1,0	0,150
Оргстекло	16,0	0,220	–	–
Фторопласт	3,10	0,028	0,341	0,017
фенилон	31.0	0,065		—
Древесина				
Прессованная (без пропитки)	–	-	0,050	0,061
Пропитанная маслом индустриальным 45	-	–	0,100	0,080
Пропитанная мотор-ным маслом	-	-	0,025	0.076
Пропитанная фторо-пластом Ф-4	-	-	0,70	0,074
Пропитанная церези-ном	-	-	0,070	0,038
Пропитанная церези-ном и стеариновой кислотой	—	–	0,135	0,028
Резина				
	I - I - I		0,250	**0,010**
Кожевенный полуфабрикат				
В сырье			0,22-10-^	**0,016**
В голье			0,20-10-^	0,014
В дубленом виде			1,7-10-*	**0,080**
Синтетический алмаз по ста				
ЗОХГСА	340	0,125	20,06	0,066
45	270	0,119	20,39	0,044
08Х18Н9Т	159	0,15	3,18	0,130
40Х	341	0,109	18,41	0,055
45	324	0,112	12,96	0,072
Трение со смазкой				
Сталь ЗОХГСА при смазке:				
ЦИАТИМ-201		0,045	0,1	0,04
АК-6	–	0,095	0,1	0,10
вазелиновое масло	–	0,100	1,0	0,12
керосин	–	0,123	1,65	0,11
Бр.Б2 при смазке:				
ЦИАТИМ-201	–	0,032	0,05	0,03
АК-6	–	0,063	0,10	0,06
вазелиновое масло	–	0,070	0,10	0,07
керосин	–	**0,073**	**0,70**	**0,06**
Бр.АЖМЦ 10-3-1,5 при смазке:				
ЦИАТИМ-201	—	0,340	0,05	0,032
АК-6	–	0,075	0,10	0,073
вазелиновое масло	–	0,08	0,10	0,078
керосин		0,10	0,10	0,10

Таблица 6.3. Коэффициент трения покоя (сцепления) [1]

Материал	*fs*
Металлы по металлу:	
тщательно очищенные от окис-ных пленок	100
несмазанные на воздухе	1,0
смазанные минеральным маслом	0,2-0,4
смазанные животным и раститель-ными маслами	0,1
Сплавы, трущиеся по стали:	
медно-свинцовый, несмазанный	0,2
медно-свинцовый, смазаиный ми-неральным маслом	0,1
Белый металл, сплав Вуда:	
несмазанный	0,7
смазанный минеральным маслом	0,1
Фосфористая бронза, латунь:	
несмазанная	0,35
смазанная минеральным маслом	0,15—0,2
Обычное железо:	
несмазанное	0,4
смазанное минеральным маслом	0,1—0,2
Стальные поверхности высокой твер-дости при смазке:	
растительное и животное масло	0,08—0,1
минеральное масло	0,12
дисульфид молибдена	0,1
олеиновая кислота	0,08
спирт, бензин	0,4
глицерин	0,2
несмазанные	0,6
Тонкие металлические пленки на твердом основании:	
пленка индия толщиной 10'\® — 10-* см	0,08
свинцовые пленки	0,15
медные пленки	0,3
Неметаллические материалы:	
стекло по стеклу, очищенные	1
смазанные жидкими углеводоро-дами, жирными кислотами	0,3-0,6
смазанные твердыми углеводоро-дами, жирными кислотами	0,1
Драгоценные камни:	
алмаз по алмазу (очищенные и дегазированные)	0,4
очищенные на воздухе	0,1
смазанные	0,05—0,1
Сапфир по сапфиру:	
очищенные и дегазированные	**0,6**
на воздухе, очищенные	0,2
на воздухе, смазанные	0,15—0,2
Графит по графиту:	
очищенные и дегазированные	0,5—0,8
на воздухе, очищенные	0,1
на воздухе, смазанные	0,1
графит по стали, очищенный и смазанный	0,1
очищенная каменная соль по ка-менной соли	0.8
Нитрат соды по нитрату соды:	
очищенные	**0,5**
смазанные	0,12

Продолжение табл. 6.

Материал	*fs*
Лед по ЛЬДУ	
ниже —50° С	0,5
между 0 и —20,;° С	0,05—0,1
Карбид вольфрама по стали:	
очищеиные	**0,4-0,6**
смазанные	0,1—0,2
Пластмассы:	
перспекс, политен по перспексу, политеиу, очищенные	0,8
по стали, очищенные	0,3—0,5
нейлон по иейлону	0,5
ПТФЭ по ПТФЭ	0,04—0,1
по стали	0,04—0,1
Натуральные волокна:	
шерстяное волокно по роговине очищенное	∫ /2=0.84-0,1
{/г — против ворса, fi — по ворсу)	1 /1=0,4^0,6
смазанное	) / =0,5-^0,3 /1=0,34-0,4
Натуральные волокна в состоянии поставки:	
хлопок по хлопку (нить)	0,3
по хлопку (хлопковая вата)	0,6
шелк **по** шелку	0,2-0,3
Дерево по дереву:	
очищенное сухое	0,25—0,5
очищенное влажное	0,2
Дерево по металлу:	
очищенное сухое	**0,2-0,6**
очищенное влажное	0,2
Дерево по кирпичу, очищенное сухое	0,3—0,4
Кожа по металлу:	
очищеииая сухая	0,6
очищенная влажная	0,4
очищенная смазанная	0,2
Тормозной материал по чугуну:	
очищенный	0,4
влажный	0,2
смазанный	0,1

Таблиц; 3.4. Трение покоя с без смазки [11]

Сплав	1	Сплав	f
Медио-свинцовый (дендритный)	0,22	Алюминиевая бронза	0,45
Медно-свинцовый (неденд ритный)	0,22	Латунь	0,35
		Констаитан	0,4
Оловянный баббит	0,8	Сталь	0,8
Свинцовый баббит	0,55	**Чугун**	0,4
Сплав Вуда	0,7		
Фосфористая бронза	0,35		

Таблиц! 3.5. Трение покоя смазанных металлов по стали [11]

Несущая поверхность	P	1 si	S 1 S E	Ė 1 5
Твердая сталь	0,14	0,12	0,16	0,09
Чугун	0,11	0,15	0,21	–
Ружейная сталь	0,15	0,16	0,21	–
Бронза	0,12	0,12	0,16	–
Чистый свинец			0,5	0,22
Свинцовый баббит			0,1	0,08
Чистое олово			0,6	0,21
Оловянный баббит	–		0,11	0,07
Спеченная бронза	–	–	0,13	
Латунь		0,11	0,19	0,13

6.6. Трение покоя льда по льду [11]

t, °С	О	I —12 I	—71 I	—82 I	—110
f	0,05—0,15	I 0,3 I	0,5 I	0,5 I	**0**,5

6.4 ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ БЕЗ СМАЗЫВАНИЯ (табл. 6.7—6.12)

Таблица 6.7. Ориентировочные значения коэффициента трения скольжения несмазанных материалов [5]

Сталь по:	
стали	0,15—0,18
чугуну	0,15—0,18
бронзе	0,16—0,20
Бронза по бронзе	**0, 2**
Дерево по бронзе	0,3
Чугун по чугуну	0,10—0,21
Железо по:	
железу	0,44
чугуну	0,17—0,18
Кожа по чугуну	0,2—0,4
Резина по чугуну	0,5—0,8
Бумага по чугуну	0,15—0,4
Дерево по чугуну	0,25-0,5
Ферродо по металлу	0,3—0,55
Фибра по металлу	0,4-0,8
Железо по:	
бронзе	0,15
дубу	0,48
Дерево по дереву:	
вдоль волокон	0,48
поперек волокон	0,34
Сталь по льду	0,014
Целлофан по:	
стали	0,27—0,29
чугуну	0,30—0,37
оберточной бумаге	0,3—0,4
миллиметровке	0.35—0,38
писчей бумаге	0,45
целлофану	0,38—0,40
коже	0,43—0,44
резине	0,95

Таблица 6.8. Значения коэффициента трения при скольжении без смазывания гладкообработанных поверхностей [5]

Материал	f	Материал	f
Сталь конструкционная по:		латуии Л62	0,16
стали конструкционной	**0,18**	дуралюмину	0.21
бронзе оловянистой	0,16	Сталь нитрованная (35ХМЮА) по:	
латуни Л62	0,19	стали закаленной	0,24
чугуну серому	0,19	текстолиту	0,36
стали закаленной	0,16	гетинаксу	0,24
алюминию	0,18	фибре	0,30
дуралюмину	0,20	Латунь (Л59, Л62) по:	
электрону	0,15	бронзе оловянистой	0.16
меди красной	0,15	латуни	0,17
текстолиту	0,22	чугуну серому	0,16
гетинаксу	0,20	дуралюмину	0,22
фибре	0,30	меди	0,30
эбониту	**0,25**	алюминию	0,17
Сталь закаленная инструментальная по:		текстолиту	0,30
стали закаленной	0,17	фибре	0,32
бронзе оловянистой	0,15	Бронза оловянистая по:	
электрону	0,14	бронзе оловянистой	0,20
агату	0,22	чугуну серому	0,21
корунду	0,16	текстолиту	0,23
меди красной	0,15	фибре	0,27
текстолиту	0,27	эбониту	0,43
фибре	0,22	Дуралюмин по:	
Сталь хромоникелевая по:		дуралюмину	**0,22**
стали конструкционной	**0,15**	меди красной	0,30
Сталь хромоникелевая по:		текстолиту	0,40
стали хромоиикелевой	0,18	фибре	0,33
		Чугун серый по:	
		чугуну серому	**0,22**
		фибре	0,31

Таблица 6.9. Коэффициент трения без смазки феноловых армированных пластмасс по стали [2]

Материал	Армирующий материал	f
Текстолит	Хлопчатобумажная ткань	0,3
Волокнит	Хлопковое волокно	0,33
Стекловолокнит	Стеклянное волокно	0,34
Асботекстолит	Асбестовая ткань	0,34—0,38
Фенолит	Графит, капрон и др.	0,2

Таблица 6.10. Коэффициенты трения полимерных и древесных материалов при трении по стали [9]

Материалы на основе полимеров:	
термопластичные	0,15-0,40
термореактивные	0,1—0,4
Углеграфитные материалы	0,2—0,35
Металлокерамические материалы	0,25—0,40
Ленточные (слоистые) материалы	0,1—0,15
Прессованная древесина, пропитанная церезином	**0,08-0,1**
Углепласты, углеграфиты:	
без смазки	0,1—0,3
со смазкой	**0,01-0,1**
Древесина, наполненная:	
раствором полиэтилена в масле МС-20,	0,08—0,12
синтетическим связующим	0,08—0,14
стеаратом (Ц) в моторном масле	0,06—0,12
стеаратом (Ц) в кремнийорганическом соединении	0,09—0,12
солями меди и их оксидами и глицерином АПД-2	0,03-0,04

Таблица 6.11. Коэффициент трения для стали из опытов с наклонной плоскостью [5]

По агату	**0,1**
гранату	**0,22**
сапфиру	0,25
стеклу	0,12—0,14
синтетическому рубину	**0,16**
рубину	0,29

Таблица 6.12. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения [9]

Материал	м/с					
	50	100	200	300	400	500
Сталь (магнито-рельсовый тормоз)	0,04					
Висмут	0,12	0,07	0,04			
Сурьма	0,25	0,18	0,14	0,1	0,07	–
Сталь	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04
Медь	0,23	0,17	0,12	0,09	0,08	0,07
Карбид титана	0,22	0,16	0,11	0,08	0,06	0,05
Оксид алюминия	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,1
Сталь 10	0,05	0,035	0,03	0,025	0,022	0,02

6.5. ТРЕНИЕ СМАЗАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИИ (табл. 6.13—6.19)

Таблица 6.13. Ориентировочные значения коэффициента трения при основных видах смазанного контакта [8]

Вид фрикционного взаимодействия	*f*
Сдвиг пленки смазки	**0,0003**
Граничная смазка	**0,02—0,01**
Гидродинамические радиальные подшипники	**0,005**

Таблица 6.14. Коэффициент трения смазанных стальных поверхностей при комнатной температуре [11]

Смазочный материал	Длина молекулярной цепи	Точка плавления, °С	*f*	Температура фазового перехода, °С
Парафины				
Нонан	**Сэ**	-54	0,26	
Декан	**Сю**	—30	0,23	
Гексадекан	**Cie**	17	0,16	17
Докозан	е..	44	0,11	44
Триаконтан	**Сзо**	66	0,11	66
Спирты				
Бутиловый	С4	-89	0,3	
Октиловый	Cs	—16	0,23	
Деканоловый	Сю	7	0,16	
Цетиловый	Cie	49	0,10	
Жирные кислоты				
Уксусная	**С2**	**16**	**0,5**	
Пропионовая	**Сз**	**—22**	**0,4**	
Валериановая	**С5**	**—35**	**0,17**	
Капроновая	**Се**	**—2**	**0,12**	**80**
Пеларгоновая	**Сэ**	**12**	**0,11**	**90**
Каприновая	**Сю**	**31**	**0,11**	**95**
Лауриновая	**Ci2**	**44**	**0,11**	**120**
Миристиновая	**Ci4**	**58**	**0,11**	**125**
Пальмитиновая	**Cie**	**64**	**0,11**	**130**
Стеариновая	**Ci8**	**69**	**0,10**	**140**

Таблица 6.15. Коэффициент трения некоторых материалов по нержавеющей стали в среде криогенных жидкостей [9]

Материал	Жидкая среда		Материал	Жидкая среда	
	Азот	Водород		Азот	Водород
Графитофтористый металл	0,18	0,22	Графит (15%)-фторпласт-4 (85%)	0,09	0,16
Графит + фенол	0,04	0,06	Графит (5%) + найлон (95%)	0,06	0,15

Таблица 6.16. Ориентировочные значения коэффициента трения материалов для подшипников скольжения по стали при смешанной и несовершенной смазке [7]

Материалы	НВ, 10^7 Па	*f*
Бронзы		
Бр. ОЦСН-3-7-5-1	65	0,013—0,016
Бр. ОЦС 3-12-5	60	0,01-0,015
Бр. ОЦС 5-5-5	60—75	0,009
Бр. ОЦС 6-6-3	60	0,009
Бр. ОЦС 4-4-2,5	60	0,016
Бр. ОЦС 4-4-4	62	0,016
Бр. ОЦ 10-2	75-90	0,008—0,060
Бр. ОФ 10-1	80—100	0,008—0,180
Бр. ОФ 7-0,2	75	0,01
Бр. ОФ 6-5-0,15	70—90	0,12
Бр. нМЦ 3-1	90	0,015
Бр. АМЦ 9-2	160	0,006—0,012
Бр. АМЦ 10-2	ПО	0,006
Бр. АЖ 9-4Л	120—140	0,012—0,040
Бр. АЖ 9-4	110—160	0,012—0,040
Бр. АЖМЦ 10-3-1,5	120—140	0,012
Бр. АМЦ 9-2Л	90-120	0,012
Бр. АЖН 10-4-4Л	140—160	0,006—0,012
Бр. АЖН 11-6-6	250	0,011
Бр. СЗО	25	0,008
ЛС 59-1Л	90-40	0,014
ЛК 80-3Л	90—110	0,01—0,19
Бр. Б2	100	0,016—0,05
Б6	32	0,005
Б16	30	0,006
Б83	27-30	0,005
БН	27—29	0,006
БТ	26	0,009
БКА	32	0,004
Углеродные материалы		
АМС-1	40	**0,1**
АМС3	35	0,065
АФ-3Т	46	0,087
АГ 1500С05	65—70 (по Шору)	0,063
Порошковые и керамические материалы		
ЖГР-1-20	60—100	0,06-0,09
ЖГР-2-20	50—80	0,06—0,09
ЖГР-3-Д	70-100	0,04—0,07
АЖГр-6-3	20—24	0,005—0,008
Бр. ОПО-2	18—20	0,004—0,008
Самосмазывающиеся полам?рныг материалы		
АМАН-2	29—31	**0,12**
АМАН-4	27—29	**0,1**
Эстеран-33	**22**	0,08
АМАН-7	18—20	0,05
АМАН-13	14—16	**0,16**
АФ-Зам (р = 0,2 МПа: ***0 = 2*** м/с)	28-30	0,12
Пластмассы		
Полиамиды:		
П-610	10—15*'	0,26—0,32
Капрои	**8—12**	0,1—0,15
П-АК-93/7	10—12*1	0,24—0,25

Продолжение табл. 6.16

Материалы	н в	f
Полиимиды:		
ПМ-67	20—30	0,35*2
ПМ-69	20—27	0,40*2
ПАМ 15-69	33	0,18*2
Полиолефины		
Фторопласт-4	3 - 6	0,03—0,1
Пентапласт		0,12
Поликарбонаты днфлон литьевой	10-11	0,3*2
Полиакрилаты	20	0,4*2

6.6. ТРЕНИЕ ПО ЛЬДУ И СНЕГУ (табл. 6.20—6.22)

Таблица 6.20. Коэффициент трения по льду и снегу [81

Вид треиия	/
По мокрому льду	0,02
По гладкому льду	0,06
Лыжи по снегу	0,10—0,30
По шероховатому льду	0,12
По плотному снегу	0,20

Таблица 6.21. Коэффициент трения по льду

Материал	г. °С					
	0	-10	-20	-40	-60	—80
Лед	0,02	0,035	0,050	0,075	0, 085	0,09
Эбонит	0,02	0,050	0,065	0,085	0, 100	0,11
Латунь	0,02	0,075	0,085	0,115	0, 140	0,15

при - 3 °с f =

Таблица 6.22. Коэффициент трения по снегу смазанной (вощеной) лыжи при скорости 0,1 м/с [11]

О	- 3	- 1 0	- 4 0
0,04	0,09	**0,18**	0,4

Таблица 6.17. Коэффициент трения в проточной воде [51 (р = 0,06 МПа; у = 6 м/с)

Материал	*f*
Бук И клен по бронзе при движении:	
параллельно волокнам	0,25-0,26
перпендикулярно волокнам	0,12—0,23
Эбонит по бронзе	0,08—0,12
Латунь по бронзе	0,25—0,35
Сталь по бронзе	0,07—0,10
Сталь с хромированной поверхностью по бронзе	0,06
Бронза по бронзе	0,04
Резина	0,22—0,26
Текстолит по бронзе	0,12—0.14

Таблица 6.18. Коэффициент трения по стали графита и нитрида бора при использозании их в качестве твердосмазочных покрытий [9]

Материал	*f*		Давление, Па
	Воздух	Вакуум	
Природный графит	0,19	0,44	8.10-'
Пиролитический графит	0,18	0,50	2,7- 10-'
Нитрид бора горячего прессования	0,25	0,70	2,7-10-7

Таблица 6. 19. Коэффициенты трения покоя fs и движения *f* материалов с рабочим слоем твердой смазки при трении по стали [9]

Материал	Режим трения (давление, скорость)	10- Па		3.10-" Па	
		fg	f	*f*^	/
АМАН-2	0,2 МПа; 4 м/с	0,44	0,18	0,1	0,1
М-801 (Мо — MoSj-Mo)	0,78 МПа; 0,265 м/с	0,4-0,5	0,1	0,15	0,5
Мо—MoSea	0,03-0,3 МПа; 0,02 м/с	0,13	0,12	0,1	0,1

6.7. ТРЕНИЕ В ВАКУУМЕ (табл. 6.23-6.26)

Таблица 6.23. Коэффициент трения стали I2X I8H10T в паре с другими сталями в условиях вакуума [9]

Сталь	Давление *Р.* Па	Система откачки	*t, "с*	10°Па	
Р9				6,43	0,232
У7	6,5-10-^	Масляная		2,54	0,32
40Х13			20	3,95	0,26
ШХ15	6,5-10-1			5,75	0,159
Р9	6,5-10-'	Безмасляная		9,65	0,575
Р9	4-10-5		200	9,65	0,545

Таблица 6.24. Трение чистых металлов при однократном скольжении на воздухе и в вакууме 10-» Па [9]

Пары треиия	Коэффициент трения		Пары треиия	Коэффициент трения	
	i? gfe	**i 1 1**			**fiSi**
Cu-Ni	0,45	1,50	Си — Fe	0,51	0,75
Та-Ni	0,23	0,90	Та —Си	0,44	0,43
W —Ni	0,21	1,36	W - Cu	0,34	0,41

1блица 6.25. Влияние остаточного давления в испытательной камере на коэффициент трения нержавеющей стали в одноименной паре

Остаточное давление. Па.	108	5-10-6	2-10-8	10-е
Коэффициент трения .	0,47	1,22	2,74	2,94

Таблица 6.26, Коэффициент трения металлов, дегазированных в вакууме [11|

Металл	Дегазированный металл	Металл после обработки	Металл после контакта с О,
Никель по вольфраму	6	6	I
Никель по никелю	5 - 8	5	2,5
Медь по меди	4,8	4,8	0,7
Золото по золоту	4,5	4,5	2,8

6.8. ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ (табл. 6.27-6.29)

Таблица 6.27. Ориентировочные значения коэффициента трения качения [8]

Трущиеся сопряжения	'к
Подшипники качения	0,0025.
Сопротивление свободному качению шин	0,01
Качение шара по резине	0,02-0,10
Трение между колесом и рельсом:	
во влажную погоду	**0,09—0,15**
в дождь	0,20
в сухую погоду	0,25—0,30
Качение цилиндра по резине	0,10—0,30
Шины:	
на мокрых дорогах	0,40
на сухих дорогах	0,70

Таблица 6.28. Коэффициент трения качения, определенный стандартным методом [12] по затуханию колебаний маятника со сферической опорой из стали ШХ15 [И]

Материал	fK
Сталь ШХ15	2,2-10-е
Сталь ШХ15, необезжиренная	2-10-8
Медь	6-10-«
Стекло	5-10-5
Кремний	3-10-8

Таблица 6.29. Значения коэффициента гистерезисных потерь [13J для ряда материалов, определенные стандартным [12] методом

Материал	с - 10»	
	Б исходном	отожженный
Кварц	0,006	—
Резина	0,1	–
Оргстекло	0,2	–
Манганин	0,31	0,016
Копель	0,31	0,1
Рений	0,33	0,024
Никель-титановый сплав	0,41	0,43
Алюмель	0,9	0,07
Хромель	0,95	0,87
Вольфрам	1,0	0,18-0,35
Бериллиевая бронза	1,0	0,57
Нихром	1,2	0,01
Сталь	1,2	0,42
Элевар	1,3	3,1
Серебро	1,6	31
Алюминий	6,3	2,1
Медь	7,8	3,1
Константан	31.4	10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка. М.: Машгиз. 1960.

2. Воронков Б. Д. Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение. 1971.

3. ГОСТ 23.002-78. Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.

4. ГОСТ 23.202-78. Обеспечение износостойкости изделий. Метод определения прочности адгезионной связи твердых тел при трении.

5. Зайцев А. К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. М.-Л.: Машгиз. 1947.

6. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977.

7. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин: Справочник. М.: Машиностроение. 1984.

8. Мур Д. Основы и применение трибоники: Пер. с англ. М.: Мир. 1978.

9 Трение, изнашивание и смазка: Справочник. М.: Машиностроение. 1978. Кн. 1.

10. Физический энциклопедический словарь/Под ред. Л. М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия. 1984.

11. Bowden F. P., Tabor D. The friction and ludrication of solids. Oxford: Clarendon Press. 1954. Pt. 1, P. 372—384.

12. ГОСТ 23.214-83. Обеспечение износостойкости изделий. Маятниковый метод измерения коэффициента трения качения.

13. Карагиоз О. В., Кочерян Э. Г., Измайлов В. П. Увеличение добротности вакуумированных крутильных систем путем отжига нити подвеса//Физ. и хим. обработки материалов. 1972. № 1. С. 87—90.

14. Силин А. А., Карагиоз О. В., Маркачов В. В., Измайлов В. П. О единстве механизма диссипации энергии при трении качения и других видах упругого деформирования твердых тел//Трение и износ. 1980. Т. 1, № 6. С. 957—964.

ГЛАВА 7

АКУСТИКА

Л. к. Зарембо

7.1. ВВЕДЕНИЕ

Скорость звука в газах и жидкостях, м/с,

Ч-1/2

где рс — невозмущенная плотность среды, кг/м®; ks — адиабатный коэффициент сжатия. Па-'. В газах

где ро — среднее давление в среде. Па, \ = cplcv — отношение теплоемкостей. Для жидкостей fts — эмпирический параметр. Разложение уравнения состояния ***p=p(p)*** в ряд по малым степеням сжатия s=(p—po)/po дает

P = ; где

— адиабатический параметр квадратичной нелинейности (для газов для жидкостей часто используется нелинейный параметр ***B1A = n—1)-,*** u=D(p) — локальная скорость звука. В однородных газах и жидкостях, за исключением областей релаксации, дисперсия скорости звука мала; в области релаксации она может достигать нескольких десятков процентов Во всех жидкостях вплоть до давлений ~ 10^ МПа скорость линейно растет с давлением. Почти во всех жидкостях (за исключением воды, некоторых расплавов металлов) скорость убывает с ростом температуры; —dVo/dT=2-^6 м/(К-с).

В изотропных твердых телах скорость продольных ***волн V1***

_ G(4G-£)

3 G - £ •"(! + fA)(1-2fj.) 14-fx

поперечных (сдвиговых) или крутильных волн ds

3/((1 - fx)

2(1 **4-(X)** 2(1 +fx)

где X — постоянная Ляме, Па; G — модуль сдвига. Па; К — модуль объемной упругости. Па; f — модуль Юнга, Па; ц — коэффициент Пуассона (все параметры адиабатические). При распространении в твердых волноводах в общем случае имеется сильная дисперсия; например, для изгибной волны в пластине толщиной ***d,*** м,

г 1W2

^,3Г

где/ — частота, Гц. Для нулевой моды продольных колебаний тонкого (диаметр D«;?i — длины волны) стержня дисперсия отсутствует:

Po4 = £-

При колебаниях пластинки по толщине оценку первой резонансной частоты можно сделать по соотношению

где L — толщина пластинки, м; *v* — скорость соответствующей волны, м/с.

На свободной поверхности твердого тела могут распространяться недиспергирующие релеевские поверхностные акустические волны (ПАВ), скорость которых для изотропного тела v^^^avs, где a= (0,87-И,12р,)/(1-)-|x)<1. Колебательные смещения из положения равновесия в этих ПАВ поляризованы в плоскости, нормальной к поверхности, содержащей волновой вектор. Деформации носят смешанный характер (объемные и сдвиговые). Глубина проникновения релеевских ПАВ порядка ***X.***

В произвольном направлении в кристаллах в общем случае могут распространяться три объемные волны: квазипродольная ***(QL)*** и две квазипоперечные — быстрая ***(FS)*** и медленная (SS) со скоростью роО^^М, где ***M*** — действующий адиабатический модуль упругости, зависящий от направления распространения и поляризации волны, в таблицах нижний индекс — направление распространения, верхний — поляризация (направление колебательного смещения). В кубических кристаллах действующий модуль для разных типов воли:

1 Si

где Сц — упругие постоянные кристалла. Для пьезоэлектрических (магнитных) кристаллов есть соответствующие добавки к и; металлизация поверхности приводит к изменению скорости релеевской ПАВ: где к — коэффициент электромеханической связи, определяющий долю связанной электроупругой энергии. На поверхности пьезоэлектрика может распространяться сдвиговая ПАВ Гуляева — Блюстейна, глубина проникновения которой порядка нескольких десятков X. В кристаллах с сильной анизотропией скорости направление потока энергии не совпадает с направлением нормали к волновому фронту, что приводит к несовпадению по направлению и величине фазовой и групповой скоростей

Точность прецизионных измерений абсолютного значения скорости звука в настоящее время высока (погрешность — 10'®). Однако такие результаты могут рассматриваться лишь для однородных чистых образцов (в кристаллах важна еще точность ориентации).

Отражение, преломление, прохождение. Коэффициент отражения по энергии плоской волны от границы раздела сред с удельными волновыми сопротивлениями 2l = p,4l и 22 = p2f2

R = fZi cos Ba — Zg cos Bi / U1 cos 62 + Z2 **COS** 61

где Bi — угол падения; Bj — угол преломления (ti|sine2= = W2Sin 6]). Коэффициент прохождения *T=l—R;* амплитудные коэффициенты ***r=R^\ t = T^H.***

Затухание. Для плоской волны коэффициент затухания по амплитуде а, м"', может быть представлен в виде

1 , Г P(0)

где *p(0), p(L)* —амплитуды звукового давления в исходной точке и на расстоянии *L*, м. Иногда для измерения *а* используют единицу дБ/м, в этом случае

Связь этих коэффициентов затухания: а (дБ/м) = =8,686 а (м-'). Часто используется временной коэффициент затухания Г, с"': *r = av,* где а выражено в м-', *V* в м/с, для Г в дБ/мкс: Г=8,686-10-® ас. Помимо а и Г характеристиками затухания являются безразмерные добротность *Q=nf/av* и логарифмический декремент затухания *б = n/Q.* В отличие от затухания, включающего рассеяние звука на неоднородностях и другие виды недиссипативных потерь, поглощение включает лишь диссипативные потери. Для газов и жидкостей коэффициент поглощения а, м"',

$$P \quad (4$$

Ро^з Ро^з

где ро — плотность, кг/м^; / — частота, Гц; т] — динамическая вязкость, Па-с; г\' — коэффициент объемной вязкости, Па-с; f —скорость звука, м/с; И — коэффициент теплопроводности, Вт/(К м); Ср — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(Кт). Для сжиженных газов, расплавленных металлов, ртути Во всех остальных случаях Г)' — экспериментально определяемая величина, обусловленная релаксационными процессами в среде. Вне области релаксации а/Р=const; в области релаксации аК имеет максимум, а а/Р характерно (в виде плавной «ступеньки») уменьшается с частотой. Увеличение амплитуды волны сопровождается ростом затухания из-за более быстрого поглощения возникающих в волне высших гармоник; это нелинейное затухание становится заметным при амплитудах звукового давления в плоской волне: *p'>2nfb.*

В поликристаллических твердых телах имеется много механизмов затухания (рассеяние на зернах, теплопроводность между зернами и др.); затухание сильно зависит от структуры. В высококачественных кристаллах диэлектриков в области комнатных температур затухание определяется взаимодействием звука с тепловыми фононами (затухание Ландау — Румера для ВЧ-звука и Ахиезера для более низких частот); при 7"'^3-^-40 К независимое от температуры остаточное затухание обусловлено взаимодействием с дефектами. В металлах и полупроводниках (особенно пьезополупроводниках) имеется электронное затухание, особенно четко проявляющееся в области низких температур и исчезающее при переходе в сверхпроводящее состояние. В магнитных материалах и кристаллах значительное поглощение обусловлено взаимодействием с доменными стенками и спиновыми возбуждениями. Частотная зависимость затухания носит, как правило, сложный характер. В высококачественных кристаллах в области высоких ультразвуковых и гиперзвуковых частот для объемных волн эта зависимость часто бывает квадратичной. В поликристаллических материалах в области низких ультразвуковых частот часто Q=const и а//=const. В области фазовых переходов затухание резко увеличивается. Увеличение амплитуды звука сопровождается, как правило, увеличением затухания (амплитудно-зависимое затухание).

Наиболее точные измерения затухания имеют погрешность несколько процентов; большинство измерений, однако, проведено с погрешностью 10—20%. Из-за чувствительности затухания к структурным и примесным особенностям образцов различие в результатах разных авторов может существенно превышать указанную погрешность. С общими вопросами акустики можно ознакомиться по [1, 4, 33, 48, 87, 132, 135, 136, 141].

7.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ГАЗАХ И ПАРАХ (табл. 7.1-7.4. рис. 7.1-7.12)

Таблица 7.1. Скорость звука в газах и парах

Вещество	*t*, °С	*f*, кГц	*о*, м/с	*Av/At*, *м(Гц-с)*	Литература
Азот	**0**		**334,0**	**0,6**	[2]
	19,1		**349,0**		[2]
Аргон	0	–	**319,0**	**0,56**	И
	20	–	**321**	—•	[2]
	30,2	**83,8**	**325,23**	–	**3**
Аммиак	**0**	–	**415**	—.	**2**
	18	–	**428,2**	–	**2**
Амиловый спирт	**136**	–	**218,8**	—•	**2**
Ацеталь	**30**	**59,6**	**257**	–	**2**
Ацетон	**18**	–	**327**	–	**2**
	97,1		**238,6**	**0,32**	**4**
	134		**251,2**	–	**4**
Бензол	**97,1**		**202,0**	**0,3**	**5**
	134	**95**	**212,6**	–	[2]
Бромистый водород	**0**	–	**200**	–	**5**
Бром	**0**	–	**135**	–	[2]
Бутиловый спирт:					
вторичный	**134**	**95**	**215**	–	[2]
третичный	**134**	**95**	**180**	—•	**2**
Воздух	**0**	–	**331,45**	**0,59**	**6**
Водород	**0**	–	**1284**	**2,2**	**2**
	18	–	**1301**	–	[2]
	100		**1463**		[2]
Водяной пар	**134**	–	**494**	–	
Винилацетат	**134**	–	**203**	–	[2]
Гелий	**0**		**965**	**0,8**	[21]
	30	**83,8**	**1056**	–	[3]
	134	**94**	**199,6**	–	[2]
Дейтерий	**0**	–	**890**	**1,6**	**5**
Двуокись серы	**0**	–	**213**	**0,47**	**2**
	20	**111**	**221,5**	–	**7**
	100	**111**	**248,5**	–	[7]
Диметиловый эфир	**97,1**	–	**274**	–	[51]
Дипропиловый эфир	**97,1**	–	**194**	–	[5]
Дихлорэтан	**97,1**	–	**181**	**0,24**	**5**
	134	—•	**190**	–	**5**
Диэтиловый эфир	**97,1**	–	**206**	**0,3**	**5**
	134	–	**217**	–	**15**
Закись азота	**0**	.—	**263**	**0,5**	[5]
	19	**93,8**	**273**	–	[7]
	109	**93,8**	**310**	.—.	[7]
Йодистый водород	**0**	–	**157**	–	**2**
Йодистый этил	**76**	**465**	**162**	–	**2**
Йодистый метил	**43**	**465**	**154**	–	**2**
Иод	**0**	–	**108**	–	**2**
Изопропиловый спирт	**97,1**	**95**	**255**	**0,4**	
	134	**95**	**270,2**		**2**
Кислород	**0**	**43,2**	**314**	-	**1**
Криптон	**30,3**	**83,8**	**224,4**	–	**3**
Метан	**—87**	**588**	**353**	–	[8]
	—20	**588**	**411**	–	[8]
	0		**430**	–	[5]
Метиловый спирт	**97,1**	**95**	**335**	**0,46**	**12**
	134		**352,6**		
Метилциклогексан	**134**	–	**185**	–	[2]
Метиловый эфир	**97,1**	**95**	**273,9**	–	**2**
Неон	**0**	—.	**433,4**	—.	**2**
	30,5	**83,8**	**461,3**	—	**2**
Оксид азота	**10**		**324**	**—**	[3]
	16	_	**332,4**	_	[2]

Продолжение табл. **9.10**

Вещество	*t*, °C	*f*, кГц	о, м/с	Дч/Д/, м/(К·с)	Литература
Оксид углерода	0	—	338	0,6	[21
	1000	27,4	717	–	[9]
	1800	27,4	909	—	19]
Пентан	134	–	220	—	[2]
Пропиловый спирт	134	95	243,9	–	
Пропионовая кислота	146	–	232	—	2j
Пропиловый эфир	97,1	50	194	–	**Ъ**
Сероуглерод	55	59,5	205		
	97,1	50	220,1	Z	5
Сероводород	0	–	289,3	–	51
Светильный газ	0	–	453	–	51
Углекислый газ	0	43,2	256,7		21
	20	58,5	274,6	–	21
	25	53	282		10]
	100	53	311	–	*h*
	500	53	425		10
Фтористый кремний	0	–	167	–	5
Хлор	0	–	206	–	2
Хлористый водород	0	–	296	–	2
Хлористый метилен	97,1	95	204	0,24	5
	134	95	213	–	5
Хлористый этил	18		428,2	–	21
Хлороформ	97,1	95	171,4	—	51
	134	95	179,7		
Циклогексан	97,1		191,3		51
	134	95	201,9		21
Четыреххлористы й углерод	97,1	95	145,2	—	5
	134	–	153,6	–	2
Четырехфтористый углерод	22	–	178,2	–	2
Этан	**10**	–	308	–	
Этилацетат	97,1		189,2	0,27	
	134	95	198,8		
Этилен	0		317		
	20	5^5	329		121
Этилметилкетон	134		223		51
Этиловый спирт	97,1	9Г	269,1	0,4	2
	134	95	28414		[2]1
Этиловый эфир	97,1	–	206,5	0,3	[2]
	134	_	217,4		12]

Таблица 7.2. Зависимость скорости звука в сухом воздухе от температуры при атмосферном давлении [11]

t, X	-30	-20	—10	О	10	20	30	100
», м/с	313	319	325	331,45[6]	338	344	350,70[3]	386

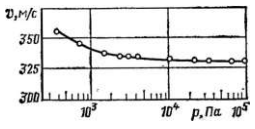


Рис. 7.1. Скорость звука в воздухе, свободном от CO_2, при атмосферном и более низком давлении (<=0''С; f=971 кГц) [12]

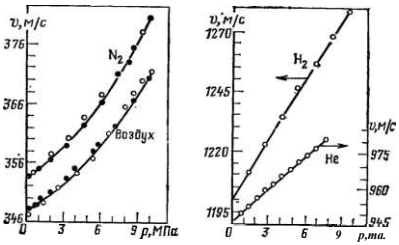


Рис. 7.2. Зависимость скорости звука в воздухе, азоте, гелии и водороде от давления [13]:
• - f - 486 кГц; 0 - ? - 286 кГц

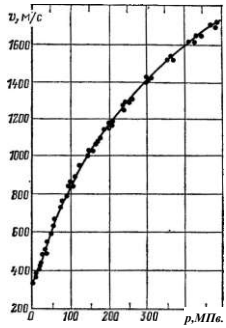


Рис. 7.3. Зависимость скорости звука в азоте от давле> ния (/=20°С; f=310 кГц) [14]

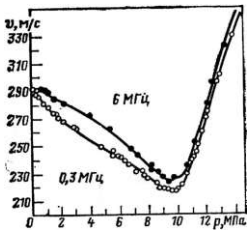


Рис. 7.4. Зависимость скорости звука в углекислом газе от давления (f=50.8°С) [15]

Vofy

°'\o.r 0,1 1,0
pKZStfTJ)

Рис. 7.5. Дисперсия скорости звука в воздухе (f=100--5-200 кГц) [161

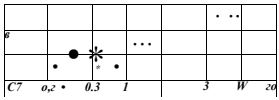


Рис. 7.6. Дисперсия скорости звука в водороде (f=s = 200 кГц) [16]

Таблица 7.3. Коэффициент затухания звука в газах и парах

Вещество	–	г а	С о і	'г «	1 1 'S'	1 ч
Азот	19,9	598,9	0,98	4,9	1,35	li*n*
Аргон	20	4250	1,01	3,42	1,9	Ii*il*
		500	0,58	8,34	–	I<Э]
		500	0,184	25,5	–	I!
Ацетон	–	97,8	–	50	525	2
Бензол	–	97,8	–	100	1050	2
Водород	19,9	598,9	1,01	12,9	3,58	2 ц
Воздух	–	1940	–	69,7	1,85	[211
Гелий	17,5	598,9	1	10,7	2,96	[17, 201
Йодистый метил	–	97,8	–	15	158	[2]1
Йодистый этил	–	97,8	–	45	474	1
Кислород	19.6	598,9	**1**	6,0	1,68	2(
Ксенон	–	500	**0,55**	–	0,15	1Ь1
	–	500	0,091	–	0,93	191
Метиловый спирт		97,8		5	52,5	II,
Неон	19	304,4	оУбб		5,82	[2(0]
Оксид азота	16,3	598,9	0,96	6,6	1,83	[2Э]
Оксид углерода	18,7	304,4	0,86	—	5,78	
Сероуглерод		97,8		120	1270	
Углекислый газ	16,6	304,4	0,99	24	27,1	[201
Хлористый метилен		97,8		70	740	[2]1
Хлороформ		97,8		70	740	[2]1
Четыреххлористый углерод	–	97,8	–	35	370	2]
Этиловый спирт		97,8	—	70	740	[2]1
Этиловый эфир	–	97,8	–	20	210	[2]1

Таблица 7.4. Затухание звука в возду шно-водном тумане, дБ/с [22]

f. кГц	Концентрация воды, г/м»				
	0.26	0,46	0,52	0,86	1,03
0,5	0,2	0,4	0,3	0,2	1,0
1,0	0,5	0,8	1,5	3,0	3,0
2,0	2,0	4,6	6,0	11,0	22,6
4,0	7,0	15,5	16,0	30,5	37,0
6,0	11,0	25,0	26,0	51,0	58,0

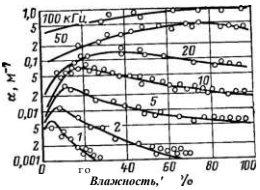
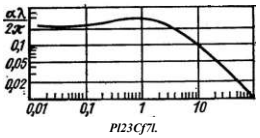


Рис. 7.7. Затухание звука в воздухе при разной частоте в зависимости от относительной влажности [23]

ЮГ'

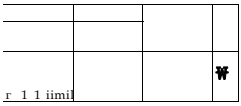
*Б в 10^ г В'Ю^*
f, кГц

Рис. 7.8. Затухание звука на высоких звуковых и ультразвуковых частотах в сухом *(1)* и влажном (отн<> сительная влажность 377о)^^(2) воздухе при <=26,5 С



Pl23Cf7l.

Рис. 7.9. Дисперсия коэффициента поглощения возду-хе (/=100^200 кГц) [161



PjiZin^fll)

Рис. 7.10. Дисперсия коэффициента поглощения в аргоне (И100н-600 кГц) [161

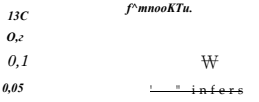


Рис. 7.11. Дисперсия коэффициента поглощения в водо^ роде U61

7.3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ

<табл. 7.5—7.15, рис. 7.13—7.26)

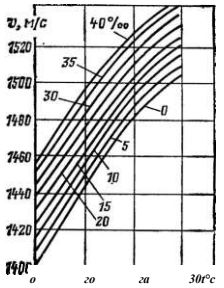


Рис. 7.12. Зависимость скорости звука в морской воде от температуры при различной концентрации солей [53]

Таблица 7.5. Скорость звука пых газах вблизи температуры кипения

Вещество	*т, к*	*V,* м/с		Вещество	*т, к*	*V, м/с*	
Азот	65	1007	m	Гелий	***2,18***	***221.7***	30]
	70	929			***2,5***	***223,3***	30
	76	869			3,0	220	31
	77	867	11		4,22	179.8	30
Аргон	64	1322	26]		4,223	[80,63	29
	78	1255	26	Гелий И	1,63	20	[32]
	84	863	25	(второй звук)	2,18	3,4	32
	87	837	25	**Кислород**	53	ИЗО	33
Водород	14,8	1340	27		60	1119	34]I
	16,5	1265	27		70	1094	34
	18,0	1260	27		80	988	и
	20,3	1127	28		85	948	1
Гелий	0,985	237,66	[29		89,6	911	251
	1,08	237,67	[29]	Метав	94,9	1545	I
	1,76	231,4	[30]		111,4	1418	**IS**I

Таблица 7.6. Скорость звука в жидкостях при 20°С

	V, м/с	$\frac{Aw}{Af}$, М/ГС • с)	Литература		*V*, м/с	$\frac{Aw}{Af}$, М/ГС • с)	Литература
Акролеин	1190			Диэтиланилин	1482	—4,0	[381
Алил хлористый (28" С)	1088			Диэтиленгликоль (25° С)	1586	—2,4	42]
Амилацетат (26° С)	II68			Диэтилкарбонат (28° С)	1173	–	37}
Амил бромистый	981			Диэтилкетон (25° С)	1218		36]
.4милформиат	1223	—4,2		Диэтиловый эфир	1008	- 5 , 4	38]
Анилин	1650	—4,0		Диэтилфталат (23° С)	1471		37]
Ацеталь (24° С)	1378			Изопропил бензол	1342	—	[38]
Ацетилацетон	*1383*	—5,2		Иден	1475	–	[38]
Ацетил хлористый	1060			Иодбензол	1114	- 2 , 7	[41]
Ацетон	1189	- 4 , 3		а-Ионон	1432	–	[38]
Ацетонилацетон	1416	- 4 , 8		Карвакрол	1475	- 5 , 0	[38]
Ацетонитрил	1304	—5,0		Кислота:			
Ацетоуксусный эфир(25^°С)	1417			валериановая	1244	- 4 , 8	38
Ацетофенон	1496	- 3 , 7		каприловая	1331	- 5 , 0	38
Бензальдегид	1479	- 4 , 0		капроновая	1280	- 5 , 0	47
Бензилацетон	1514			малеиновая	1352	- 3 , 8	38
Бензил хлористый	1420	- 4 , 6		масляная	1203	- 4 , 8	38
Бензоил хлористый (28° С)	1318			муравьиная	1287		38
Бензол	1324	- 4 , 6		олеиновая (45° С)	1333	- 3 , 3	46
Бензол тяжелый	1238	- 4 , 2 5		пальметиновая (62,1° С)	1328	–	47
Бромаль	966	- 3 , 4		пировиноградная	1471		[38]
Бромбензол	1170	—3,12		пропионовая	1176	- 5 , 0	[38]
а-Бромнафталин	1372	—3,1		серная (15° С)	1440	–	[48]
Бромоформ	931	**—2,2**		тиоуксусная	1168	–	38
н-Бутилацетат	1226	—4,1		уксусная	1150	–	
изо-Бутилацетат	1182	—4,0		фумаровая	1303	- 3 , 5	49
Бутил:				элаидиновая (45° С)	1346	—3,5	
бромистый	990	- 4 , 0		энантовая	1312	- 5 , 0	
иодистый	977	—3,6		Коричный альдегид (25° С)	1554	- 3 , 1	42]
хлористый	1133			орто-Крезол (25° С)	1506	- 3 , 5	[42]
2,3-Бутиленгликоль(25°С)	1484			Кротоновый альдегид	1288	—4,1	[36
Бутилформиат	1215	**- 4 , 1**		***мета-Ксилол***	1344	- 4 , 1	[36
Вода	1482,7	+3,1		н-Ксилол	1330	—4,8	[38
Вода тяжелая (25° С)	1399	**+2,8**		орто-Ксилол	1364	- 3 , 8	36]
Гексан	1083			Линалоол	1341	–	38]
Гексил:				Мезитилен	1362	- 4 , 8	38]
иодистый	1081	—3,2		W-Метиланилин	1586	–	38]
хлористый	1221	—4,2		Метилацетат	1182	- 4 , 7	36
Гемеллитол	1372			2-Метилбутанол (30° С)	1225	—	50)
Гептан	1162			Метилгексалин (22,5° С)	1528	–	37]
Гептанон	1207			Метилгексилкетон (24° С)	1324	–	37]
1-Гептен	1128			Метилен: .			
Геранилацетат (28° С)	1328			бромистый	963	- 2 , 6	[41
Гидринден	1403			иодистый	973	- 1 , 9	[41
Глицерин	1895			хлористый	1093	- 3 , 9	[41
1-Децен	1250			Метилизопропилбензол (28° С)	1308	—	[37]
Децил хлористый	1318			Метил иодистый	834	—	38
Диамиловый эфир (26° С)	1153			Метилпропионат (24,5° С)	1215		37
Дибромэтилен	1009			Метилсалицилат (28° С)	1408		37
Диацетил (25° С)	1236	- 4 , 5		Метилциклогексан	1247	—5,6	[38
Дибромэтилен	957	- 2 , 4		2-Метилциклогексанол (25,5° С)	1421	—	[37]
гароке-Дибромэтилен	936	**- 2 , 2**		4-Метилциклогексанол (25,5°С)	1387	–	37]
Диметиланилин	1509	- 3 , 6		2-Метилциклогексанон	1353		37
Диоксан	1389	**- 6 , 2**		Метилэтилкетон	1207	- 5 , 0	38
Дипентен (23,8°С)	1328			Монохлорнафталин (27° С)	1462	–	37
Дипропиловый эфир	1112			Морфолин (25°С)	1442	—3,7	[42
Дифенилметан	1501			Никотин	1491	- 5 , 0	[38
Дифениловый эфир (24° С)	1469			Нитробензол	1475	- 3 , 4	[36
jnema-Дихлорбензол (28° С)	1232			Нитрометан	1346	—4,1	[38]
орто-Дихлорбензол	1295						
Дихлорэтан (23° С)	1240						
Чг^с-Дихлорэтилен	1090	- 3 , 7					
/прокс-Дихлорэтилен	1031	—3,7					

Продолжение табл. **9.10**

	Литература	М/СС • с)
жето-Нитротолуол	1481	
орто-Нитротолуол	1473	
Нонан	1248	
1-Нонен	1218	
Оксид мезитила	1310	
к-Октан	1192	- 4 , 2
йЗО-Октан	1111	
1-Октен	1184	
Октил:		
бромистый	1182	
хлористый	1280	
Параль дегид	1192	
1-Пентадецен	1351	
Пентан	1008	
Пентахлорэтан	1113	
Перхлорэтилен	1066	
а-Пиколин (28" С)	1453	
Р-Пиколин (28° С)	1419	
Пинен (24" С)	1247	
Пигередин	1400	
Пиридин	1441	
к-Пропилацетат	1198	
шо-Пропилацетат	1133	
Пропил:		
иодистый		
хлористый		
Пропионитрил	1271	
Псевдобутил-метаксилол	1354	
Псевдокумол	1368	
Салициловый альдегид (27" С)	1474	
Сероуглерод	1158	- 3 , 2
Спирт:		
н-амиловый	1294	
изо-амиловый	1260	—3,4
т;5ет-амилоБЫЙ	1204	
бензиловый	1540	
и-бутиловый	1263	—3,6
«зо-бутиловый	1212	—3,5
н-гексиловый	1322	—3,5
н-гептиловый	1341	—3,7
н-деканоВый	1402	—3,7
децИловый	1413	—4,4
тетрадециловый (38,4° С)	1404	
додециловый (22,3° С)	1433	
метиловый	1123	- 3 , 3
н-нониловый	1391	—4,3
н-октиловый	1358	—3,6
н-пропиловый	1223	—3,7
кзо-пропиловый	1170	- 4 , 0
н-пентиловый	1294	- 3 , 5
7-фенилпропиловый (30° С)	1523	
Р-фенил этиловый (30° С)	1512	
фуриловый (25° С)	1450	- 3 , 5
этиловый	1165	- 3 , 4
Стирол	1354	
Тетрабромэтан	1041	
Тетралин	1492	
Тетранитрометан	1039	
Тетрахлорэтан	1171	
Тетрахлорэтилен	1053	—2,9
Тетраэтиленгликоль (25° С)	1586	—3,0
Тиофен	1300	—4,2
жета-Толуидин	1594	- 3 , 5
орто-Толуидин	1618	—3,9
Толуол	1328	- 4 , 3
1-Тридеден	1313	
Триметиленбромид (23,5° С)	1144	
Триолеин	1482	
1,2,4-Трихлорбензол	1301	
Трихлорэтилен	1049	—4,4
Триэтиленгликоль (25° С)	1608	—3,8
Уксусный ангидрид (24° С)	1384	
1-Ундецен	1275	
Фенилгидразин	1738	
Фенол (100° С)	1274	—3,2
Формамид	1550	
Хинальдин	1575	
Хинолин	1600	- 4 , 8
Хлорбензол	1289	—3,7
а-Хлорнафталин	1481	
Хлороформ	1005	- 3 . 6
жетс-Хлортолуол	1326	
орто-Хлортолуол	1344	
к-Хлортолуол	1316	
Циклогексан	1277	—4,6
Циклогексанол	1493	- 4 , 9
Циклогексанон	1449	- 5 , 4
Циклогексен	1305	- 5 , 4
Циклогексиламин	1435	
Циклогексил хлористый	1319	
Циклопентадиен	1421	
Циклопентан (30° С)	1182	
Циклопентанон (24° С)	1474	
Цитраль	1442	—3,8
Четыреххлористый углерод		- 3 , 0
Этилацетат	1177	—4,5
Этилбензиланилин	1586	
Этилбензол	1338	
Этил:		
бромистый	900	- 3 , 4
иодистый	876	- 2 , 7
Этилбутират	1197	- 4 , 1
Этилен:		
бромистый	1009	**—2,6**
хлористый	1216	—3,9
Этиленгликоль	1667	—2,5
Этилкаприлат (28°С)	1263	
Этиловый эфир:		
диэтиленгликоля (25°С)	1458	
орто-крезола (25° С)	1315	
фенола (26° С)	1153	
хлоруксусной кислоты (25,5°С)	1234	
Этилпропионат (23,5° С)	1185	
Этилфенолкетон	1498	
Этилформиат (24° С)	1121	

Таблица 7.7. Скорость звука в маслах, нефти и нефтепродуктах [52]

Вещество	/, «С	ti, м/с	Вещество	t. =c	V,-JC	Av/&t, м/СС • с)
Масло:			Авиамасло:			
анисовое	28,5	1451	МС-20	20	1506	-3,9 1
арахисовое	31,5	1562	компрессорное	20	1503	-4,0 1 i 1
вербеновое	29	1323	КС-19			
веретенное	32	1342	трансформаторное	20	1445	-3,8 [53]
газолиновое	34	1250		25	14!5	[48]
геранневое	27	1192	Бензин А-66	20	1081	—4.0
горчичное	31,5	1825	Бензин А-72	19,6	1158	– 53]
иононовое	34	1331	Гудрон масляный	20	1512	-3,7 [53]
кассиевое	28,5	1460	Дизельное топливо «Лет-	20	1357	—4,15 [53]
касторовое	21	1500 [33]	нее»			
кедровое	29	1406	Дизельное топливо «Зим-	20	1332	—3,9 [53]
кокосовое	31,5	1490	нее»			
ксанторидзиевое	29	1394	Керосин	34	1295	–
кунжутное	32,5	1432	Нефть отечественных	–	1335-ь	
лавандовое	28,5	1310	месторождений		1379	—3,88 - -4,09 [53]
лимонное	29	1076				
линалооловое	32	1397				
льняное	31,5	1772				
оливковое	32,5	1381				
парафиновое	33,5	1420				
сосновое	31	1468				
спермацетовое	33	1210				
сурепное	30,8	1450				
терпентинное	27	1280				
эвкалиптовое	29,5	1276				

7.8. Скорость звука в дистиллированной воде зависимости от температуры при = 980 ГПа [43]*

/, 'С	V, м/с		И. м/с	t. 'С		t. 'С	р, м/с
	1400+		1400+		1500+		1500+
0	2,7	26	99,6	51	43,9	76	55,4
1	7,7		1500+	52	44,9	77	55,3
2	12,6	27	2,2	53	45,9	78	55,2
3	17,3	28	4,7	54	46,8	79	55,0
4	22,0	29	7,1	55	47,7	80	54,8
5	26,5	30	9,4	56	48,5	81	54,6
6	30,9	31	11,7	57	49,3	82	54,3
7	35,2	32	13,9	58	50,0	83	54,0
8	39 5	33	16,1	59	50,7	84	53,6
9	4э]6	34	18,1	60	51,3	85	53,2
10	47,6	35	20,1	61	51,9	86	52,8
И	51,5	36	22,1	62	52,4	87	52,4
12	55,3	37	23,9	63	52,9	88	51,9
13	59,1	38	25.7	64	53,4	89	51,3
14	62,7	Э9	27,5	65	53,8	90	50,8
15	66,3	40	29,2	66	54,1	91	50,2
16	69,7	41	30,8	67	54,4	92	49,6
17	73,1	42	32,4	68	54,7	93	48,9
18	76,4	43	33,9	69	54,9	94	48,2
19	79,6	44	35,3	70	55,1	95	47,5
20	82,7	45	36,7	71	55,3	96	46,8
21	85,7	46	38,1	72	55,4	97	46,0
22	88,6	47	39,3	73	55,4	98	45,1
	91,5	48	40,6	74	55,5	99	44,3
24	94,3	49	41,7	75	55,5	100	43,4
25	97,0	50	42,9				

Игмерения проведены на частотах *f* 0,73 I МГц. См. также [54].

Таблица 7.9. Скорость звука в расплавах

Вещество	г. °С	г, м/с	Ы	- t v / A t , м/(К • С)	Литература
Алюминий	660	4673—4730		0,16—0,47	56,
Бромистый калий	742	1770	745—1010	0,67	
Бромистый натрий	745	1798	750—1010	0,63	
Висмут	280	1649-1663	289-356	0—0,08	[58, 591
Галлий	30	2740—2872	30—275	0,23	[60, 61
Индий	156	2215—2315	156—950	0,27—0,5	[60 61
Йодистый калий	682	1555	690—1020	0,64	57]
Йодистый натрий	660	1502	670—1030	0,54	[57]
Кадмий	321	2200—2256	321—750	0,29—0,62	[60-621
Калий	64	1820—1880	64—160	0,5—0,53	[60, 63. 64]
Медь	1100	3460	1083-1500	0,46	[61]
Натрий	100	2395-2653	98-700	0,3-0,66	60:, 63, 64, 66]
Олово	232	2270—2480	232—1000	0,21—0,7	[60, 61, 67-69]
Ртуть	20	1450—1452	0—204	0,31—0,7	[68, 70—72]
Рубидий	39	1260	39—160	0,4	[60]
Свиней	327	1790—1820	327—1000	0,3—0,53	60—62]
Сера	115	1315			[60]1
Серебро	970	2710-2770	961-1540	0,41—0,47	61, 73]
Сурьма	630	1980	630—880	0	[73]1
Таллий	302	1625			60
Теллур	460	920	460-950	Изменяет знак	61
Хлористый калий	770	2275	785-1020		57
Хлористый натрий	800	2483	810—1010	0^92	[57
	29	967	29—130	0,3	[60
Е	420	2700—2850	419—850	0,27—0,31	[60 61, 73, 74]

Таблица 7.10. Скорость звука и ее анизотропия в жидких кристаллах

Вещество	t. °с	V, 10» м/с	Литература	Вещество	t. °С	t). К м/с		Литература
						e = o-	e = so	
Холестериллинолеат	30	1,54	[82]	Диэтил-р-р-азоксидибензоат	117,4	1,275	1,23	[84]
	50	1,44			113,2	1,30	1,255	
Холестерилпропионат	ШО	1,268	[83]	Этил-*р*-метоксибензилиден аминоциннамат	88,2	1,65	1,56	[85]
	124	1,204				1.475 (	= 45°)	
Холестерилаурат	73	1,384	[83]					
		1,268						

I — угол между направлением распространения звука и осью спирали геликоида.

Таблица 7.11. Скорость фронта ударной волны в жидкостях

	/, °С	Отношение плотности до фронта / за фронтом волны	Скачок давления, 10ъ МПа	Скорость фронта, м/с	Вещество	t. °С	Отношение до фронта к плотности за фронтом	Скачок давления, 102 МПа	Скорость фронта, м/с
Вода	20	0,716	31,4	3354	Метиловый спирт	15	0,625	46,0	3950
		0,658	57,4	4126	Четыреххлористый углерод	22	0,622	72,9	3510
		0,620	86,6	4813					
		0,622	84,3	4757	Глицерин	18	0,710	75,6	4580
		0,577	131	5604	Ацетон	30	0,623	45,7	3970
		0.488	329	8070	Бензол	16	0,647	51,6	4100
		0,456	383	8450	Толуол	15	0,650	51,5	4120
		0,444	395	8490					
		0,450	414	8740					

Таблица 7.12. Параметр я адиабатической квадратичной нелинейное! жидкостей

Азот (—195° С)		
Аргон (-187° С)	6,01	
Ацетон	9,6—10	
Амилацетат	**6,1**	
Бензин А-70	11,2	
Бензол	9,4-10,5	
Висмут (318° С)	**8,1**	
Вода	6,06—7,6	93, 94]
Вода тяжелая	5,52	
Водород (-259° С)	6,59	
Пароводород (-258° С)	**8,12**	
Гептан	**11,16**	
Глицерин	10,4	
Додекан	11,41	
Дихлорэтан	8.6-8,7	
Индий (160° С)	5,5	
жета-Ксилол	9.7-10,6	90, 93]
Метан (-!63°С)	18,95	
Натрий (110° С)	3,7	
Нонан	11,35	
Октан	11,34	
Олово (240° С)	5,4	
Ртуть (30°С)		
Спирт:		
н-бутиловый	9,6	
н-гексиловый	10,7	
н-децило вый	9.6	
метиловый	8,6—9,7	87 90,91]
н-нониловый	**10,0**	[90]
н-октиловый	9.7	[90]
н-пропиловый	9,9	[90]
этиловый	10,6—11,0	190.9П
Толуол	10,4—11,2	
Трансформаторное масло	7,5	
Четыреххлористый углерод	11.4—11,8	3,91]
Хлороформ	11.5—11,6	),91]
Этилацетат	**6,0**	
Эфир этиловый	4,1	[87]

Таблица 7.13. Зависимость нелинейного параметра n воды от температуры и давления [97]

t, °С	Давление, кПа					
	0,1	25	50	100	400	800
0	5,08	5,90	6.58	7,35	7,60	—
30	6,21; 7.0 |90|	6.43	6,63	6,83	7,19	–
50	6,55; 7.3 |90	6,62	6,69	6,80	6,97	6,68
80	6,74; 7.7 90	6,79	6,84	6,86	6,64	6,50
95	8,1 90	–	–	—	—	—

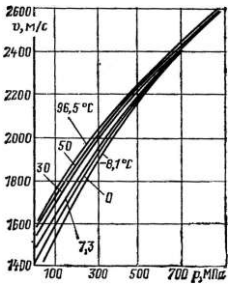


Рис. 7.13. Зависимость скорости звука в воде от давления при различной температуре [801

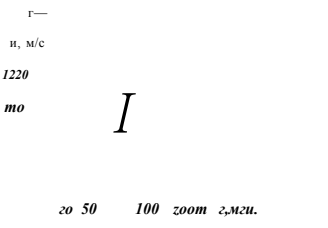


Рис. 7.14. Дисперсия скорости звука в сероуглероде при 25°С (колебательная релаксация C-S-связи) [81]

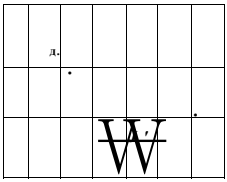


Рис. **7.15.** Скорость звука Б жидком гелии вблизи Я-точки (точки перехода Не 1 в сверхтекучее состояние Не1Г) [65]

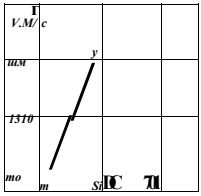


Рис. 7.16. Зависимость скорости звука от температуры в жидком висмуте [61]

Таблица 7.14. Коэффициент поглощения **звука в** жидкостях

			а//^ 10-» с^/м	
Азот	-199,3	44,4	10.5	100]
н-Амилацетат	20	20—200	65	
орто-Анизидин	24,8	104,3	58,8	
Анизол	24,8	104	43,8	101
Аниса льдегвд	24,6	104,1	63.6	[101
Анилин	25	0,3—0,6	50	[36]
Аргон	-188	44,4	10,1	[100]
Ацеталь	25	100—200	57—43	
Ацетил хлористый	24,6	104		
Ацетон	25	20—1900	31-128	36, 105]
	25	1—4	70	42
	25	7-10	80	
Ацетонитрил	25	15-20	50	
Ацетофенон	25	10—200	58	
Бензилацетон	25	10—200	53	36
Бензилметилкетон	25	20—200	74	[36]
Бензилхлорид	25	0,5-30	880-870	1102]
Бензол:	20	482	445	[104]
	20	1200—1900	184-95	105]
бромистый	25	20-100	145	
	25	1000-1900	128-94	
иодистый	25	20-260	210	104]
Бензотрихлорид	25	100—200	107	
к-Броманизол	25	100—200	62	
орто-Броманизол	25	100-200	70	
Бромоформ	25	0,2—200	250	
Бутил:				
бромистый	2	15		
иодистый	2	15		
хлористый	2	15		102]
н-Бутилацетат	20	40-200	46	
«30-Бутил ацетат	25	20—200	55	36]
	20	7-1900	25	[36, 104,105]
	20	843	24,2	1041
Водород	—256,2	44,4	5,6	36]
н-Гексан	25	20—200	60	36]
н-Гептан	25	1—15	80	[36]
Гелий	—270,2	15	ПО	
Глицерин	−18, 8	30	12 200	
	20-27	0,15—4	2500	42]
Декагидронафталин	25	Юа—200	121	136]
1,2-Диброметан	25	30	311	[107]
1,1-Диметилциклогексан	24,1	104,1	127	[101]
1,4-Диоксан	25	100—200	114	[36]

Продолжение табл. **9./0**

	i. "C	f, МГц	*α/f^* 10-» cVM	Литера!
орто-Дихлорбензол	24	100-200	131	36]
1.1-Дихлорэтан	25	30	100	36]
1.2-Дихлорэтан	30	0,7—1,2	105	102]
транс- Дихлорэтилен	25	30	360	36]
Диэтиламин	25	100—200	35	36
Диэтилкетон	25	10—200	25	36
Изопрен	15	10—190	58	36]
Инден	25	100—200	133	36
Кислород	-213,2	44,4	8,6	36
Кислота:				
дихлоруксусная	25	100—200	214—201	36]
	25	100—200	170	36]
муравьиная	17,5	*4*	2270	108
	20,5	9.8	1170	108
уксусная	18	0,5	30 000	109
	18	67,5	158	36
	25	100—200	140	36
фурфуриловая	25	100—200	91	36
Коричный альдегид	24,8	104,2	96	10
Кротоновый альдегид	24,6	104,2		101]
ор/по-Ксилол	25	20-200	**65'**	36]^
пара-Ксилол	25	1-20	60	36]
Масло:				
касторовое	18,6	3,16	10 900	106
	20	1,43	6000	110
льняное	20,5	3,1	1470	110
оливковое	21—25	1-4	1250	111
Мезитилоксид	24,4	104,1	35,7	101
Метилаль	***24,4***	104.1	39.2	101
Метилацетат	25		468	111
	24,4	104,2	36	101
Метилбензол	20	27—482	80	104
Метилбутират	24,5	164,1	35,3	101]
Метилдисульфид	24,9	104	58,7	101]
Метил:				
бромистый	2	15	300	136]
иодистый	25	15—200	310	[36]
Метилен:				
бромистый	2	15	304	36]
	25	30	560	36]
	25	1000—1900	104-40	1051
	25	1—4	816—820	36]
	25	30	250	36
хлористый	20	21,6	920	104]
	20	482	171	104
Метилсалицилат	24,5	104	57,5	101
Метилформамид	24,6	104,1	32	101
Метилформиат	25	5-25	50	36]
Метилциклогексан	25	100—200	95	36]
Метилэтилкетон	25	10—200	30	36
ор/по-Нитроанизол	25	100-200	70	36
Нитробензол	25	0,3—200	73	36
Нитрометан	25	7—10	90	36
н-Пропилацетат	20	40—200	40	36
ызо-Пропилацетат	25	20-200	65	36
ызо-Пропилбензол	25	2-200	64	36
Пропил:				
бромистый	2	15	39	103
иодистый	2	15	54	103
хлористый	2	15	42	103
Р-Пиколин	24,5	100—200	65	36]
Пиридин	0	0.25-1,0	334	114]
Сероуглерод	20	1—10	6000	108]
	25,5	189,2	776	101]
	25	1000—1900	37-17	105]

Спирт:				
алиловый		100—200	45	
н-амиловый		21	102	
изоамиловый		100—200	131	
бензиловыи		50—200	79	
н-бутиловый		4—200	81	
изобутиловыи		100—200	140	
метиловый		7—250	33	
н-пропиловый		15-280	75	
изопропиловый		15	92	
этиловый		**8—220**	53	
фурфуриловый		100—200	91	
Толуол		0,15	205	
		100—200	**86**	**и ?**
		1000-1900	81-66	
	20	301	775	105
Тиофен	**20**		469	104
	20	482		104
	20	843—1900	160—46	104 1051
Толуидин	25	27—482	50—60	107]
Трибромэтан	25	10—110	200	36]
Трихлорэтан	30	**1,0**	245	**102]**
	25	10—110	130	36]
Трихлорэтилен	25	**0,2-0,6**	**200**	
Тетрахлорэтилен	25	0,2—0,4	304	
Уксусный ангидрид	30	0,7—1,2	445	**i**
		104	58	
Формамид		10—100	40	
Фторбензол	25	30	278	36
	25	1000—1900	221 — 140	105]
орто-Хлоранилин	25	100-200	54	36]
Хлорбензол	25	1—200	140	
		1000—1900	125—96	l1051
Хлороформ		**0,2—200**	418-380	[36]
	20	1000—1900	220—106	[105]
орто-Хлорфенол	25	100—200	95	136]
2-Хлорэтанол	24,4	104,1	59	101]
Циклогексан	30	0,6—1,2	250	102]
	25	100—200	101	36
Циклогексанон	25	100—200	71	36
Циклогексен	25	100—200	102	36
Циклогексиламин	25	100—200	64	
Четыреххлористый углерод	30	0,5—1,2	560	Ш2)
	25	3-200	540—517	[36, 104]
	20	482	480	[104]
	20	1000—1900	405-226	[105]
Эпихлоргидрин	24,4	104,1	68	**[101]**
Этаноламин	24,8	100-200	152	[36]
Этил:				
бромистый	25	1-200	70—62	
иодистын	**2**	15	40	[36]
Этилацетат	30	0,8—1,2	258	
	25	**1.0**	500	
	20	40—200	35	
Этилбензол	25	100-200	55	
Этилбутират	24,4	104		
Этилформиат	25	**20-100**	50	
Этилен:				
бромистый		**0,2—200**	300	
хлористый		1-30	140	
Этиленгликоль		5-15	120	
Эфир:				
изопропиловый		104	53	
этиловый		10—100	45	

Таблица 7.15. Коэффициент поглощения звука в расплавах металлов

Вещество		*a / f*, 10-« с2/м	Литература	Вещество	*t*, "С	a/f2, 10-15 *с²/м*	Литература
Висмут	280	8,05	741	Натрий	100	***1-1,5***	[721
	305	9,3	72:1	Олово	240	5,63	[74]
Галлий	30	1,58	75	Ртуть	25	5,7—6,2	72,75]
Кадмий	360	14,5	74	Свинец	340	9,4	[74]
Калий	75	29,9	72	Цинк	450	3,7	[74]

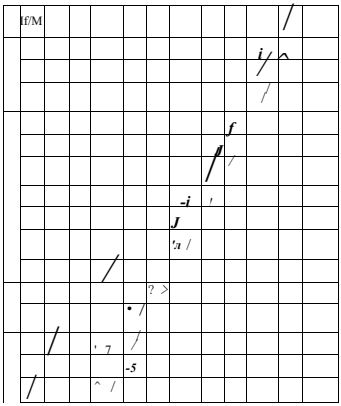


Рис. 7.17. Затухание звука в пресной и морской воде на высоких звуковых и ультразвуковых частотах: *1* — теория; 2 — эксперимент для морской и пресной воды; 3 — эксперимент для морской воды; 4 — эксперимент для пресной воды; 5 — экстраполяция данных для пресной воды [981

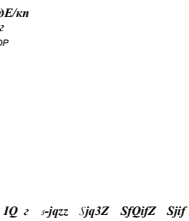


Рис. 7.18. Затухание звука в морской воде на низких частотах: сплошная линия — усредненные результаты измерений на длинных океанических трассах [99]; пунктир — область разброса экспериментальных данных

1Q г »jqzz Sjq3Z SfQifZ Sjif f.ru.

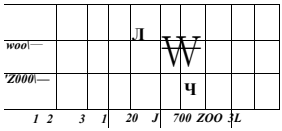


Рис. 7.19. Зависимость a/P от частоты в углероде при г=25°С (колебательная релаксация -связей)

О-данные [105]

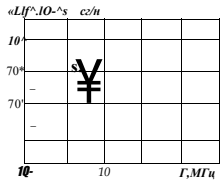


Рис. 7.20. Частотная зависимость a/P в уксусной кислоте при *t=20—25°C* [116]:
л ^данные Л17]. полученные по тонкой структуре рассеяния света

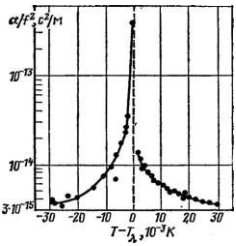
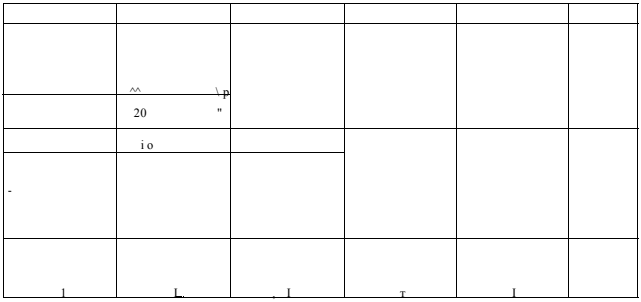


Рис. 7.21. Зависимость *a/f^* вблизи Я-точки в гелии (*f*— = 1-М2.1 МГц) [119]



70-2

Рис. 7 22 Зависимость а/f^ от частоты (две области релаксации) в капроновой кислоте при разной температуре [118]

60

г 20

S J0

10 ZD 30 W t,%

Рис. 7.23. Зависимость а/Р в воде от температуры (f=0,1-4-100 МГц) [54, 120]

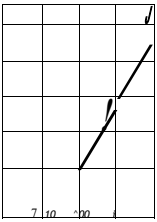


Рис. 7.25. Зависимость а/Р для к-бутилового спирта от давления [79]

7t/ui~
«/«о

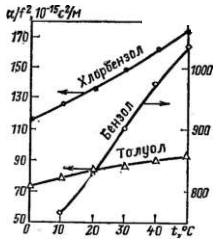
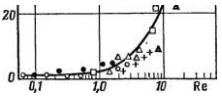


Рис. 7. 24. Зависимость а/Р от температуры для хлорбензола (f= 15^30 МГц), толуола (/=12н-16 МГц) и бензола ^=6-12 МГц) [121]

Рис. 7.26. Нелинейное затухание в воде — зависимость коэффициента поглощения, от амплитуды волны р'(Ке=р'/2яЬ/. *b = p^am^V-*
Ф-П221; 0-[1231; А -[1241: Д ^ (125]; +-[126]; О - [127]



7.4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ (табл. 7.16-7.26, рис. 7.27-7.51)

Таблица 7.16. Скорость звука и удельное волновое сопротивление поликристаллических и аморфных твердых тел (t = 20° С)

Вещество	Скорость звука, 10^3 м/с			Волновое сопротивление, 10^6 кг/(м² • с)		Литература
	в стержне "ст	продольная	поперечная			
Алюминий	5,08	6,26	3,08	169	83,2	[4]
(372° С)	4,34	–	–	–	–	[29]
Бериллий (27° С)		12,55	8,83	232	162	[130]
Висмут	1,79	2,18	1,10	214	108	[4]
Вольфрам	4,31	5,46	2,62	1042	500	[4]
Железо	5,17	5,85	3,23	456	252	[4]
Золото	2,03	3,24	1,20	626	232	[4]
Иридий	—	2,56	0,81	187	59	[131]
Иридий	4,79	–	–	–	–	[4]
Кадмий	2,40	2,78	1,50	240	129	[4]
Константан	4,30	5,24	2,64	460	232	[4]
Латунь	3,49	4,43	2,12	361	172	[4]
Магний	4,90	5,78	—	101	—	[132]
Манганин	3,83	4,66	2,35	393	197	[4]
Марганец	3,83	4,66	–	346	–	[132]
Медь	3,71	4,70	2,26	418	201	[4]
Молибден		5,67	3,51	511	316	[133]
Нейзильбер	3,58	4,76	2,16	400	181	[4]
Никель	4,79	5,63	2,96	495	260	[4]
Олово	2,73	3,32	1,67	242	122	[4]
Оргстекло		2,67	1,12	30	13	[4]
Платина	2,80	3,96	1,67	846	357	[4]
Свинец	1,20	2,16	0,70	246	80	[4]
Серебро	2,64	3,60	1,59	380	167	[4]
Сталь (различные марки)	5,0-5,2	5,68—6,10	–	445—477	—	[53, 134]
Сурьма	3,40	—.	–	–	–	[132]
Тантал	3,35	—.	–	–	–	[132]
Титан	5,04	6,33	3,11	285	139	[133]
Хром		4,2	–	300		[135]
Цинк	3^1	4,17	2,41	296	171	[4]
Чугун	3,85	4,50	2,40	350	187	[136]
Стекло:						
плавленый кварц	—	5,935	3,740	132	83	[137]
боратное (17° С)		3,47	1,25	62	23	[48]
германатное (17° С)	–	3,61	2,21	130	80	[48]
халькогенидное (AsoSg)	–	2,58	1,49	85	50	[48]
(As,,Se3) (17° С)		2,23	1,29	103	100	[48]
стеклообразный селен	—	1,84	0,96	79	41	[48]
фтористый бериллий /1-70 гг	_	4,70	3,90	221	183	[48]
кронглас	5,30	5,66	3,42	141	86	[4]
тяжелый кронглас	4,71	5,26	2,96	—	—	[4]
флинтглас	—.	4,26	2,56	154	92	[4]
легкий флинтглас	4,55	4,80	2,95	–	—.	[4]
тяжелый флинтглас	3,49	3,76	2,22	173	102	[4]
Винипласт	–	2,30	–	-	–	[53]
Найлон	—.	2,65	—	–	—	[138]
Полистирол	—	2,35	1,12	–	–	[4]
Полиэтилен	–	2,48	–	–	–	[138]
Фторопласт		1,34	–	—	–	[138]
Эпоксидная смола ЭД-5		2,58	1,22	29	13	[53]
Каучук	—	1,48	–	13	–	[4]
Эбонит	1,57	2,40	–	28	–	[4]
Пробка	0,50	—	—	—	—.	[4]
Фарфор	4,88	5,34	3,12	128	75	[4]
Парафин	1,46					[136]
Лед (0°С)	3,28	3,98	1,99	37	19	[4]

Продолжение табл. 7.16

		Скорость звука, 10® м/с		Волновое сопротивление 1№ кг/(м2 . с)		
		продольная "г		*h*		
Гипс		4,79	2,37	111	55	[48]
Гранит	3,95	4,45—5,57	2,78	165 - 2 0 6	103	[53, 132]
Мрамор	3,81	4,95—6,15	3,26	137-166	88	[132, 139]
Сланец	4,51					[132]
Дерево (дуб)	4,05					[136]
Базальт		5,40—6,15	3,14—3,26	145-166	85-88	[139]
Известняк		4,64-6,13	2,39-3,2	125—165	64-86	[139]
Антрацит*		Иц = 2,52; yj^ = = 2,15		г„ =40; 3^=34		[140]
Уголь газовый (Донбасс)'		t, = 1,78-2,0;		г„ = 23-26; Z, =16		[140]
Уголь коксовый (Донбасс)*		.„ = 1,54; . , = 1,50				[140]

' И‖—скорость параллельно слоистости; Vi_ — перпендикулярно слоистости.

Таблица 7.17. Скорость звука в кубических кристаллах (*t* = 20 —25° С)

	плотность, 10», кг/м3	*V*, 10^ м/с						Литература
		L.00	s,,,,,	1.x.o	—		*Silt*	
Алмаз	3,51	17,5	12,8	18,3	11,6	18,6	12,0	148,1411
Алюминий	2.70	6,284	3,26	6.47	2,86	6,473	3,00	[48,141, 146]
Антимонид:								
галлия	5,62	3,96	2,77	4.38	2,07	4,51	2,33	[48,141]
индия	5,79	3,42	2,26	3.77	1,63	3,89	1,87	[142,1601
Арсенид:								
галлия	5,31	4,71	3,34	5,24	2,47	5,40	2.79	48,160]
индия	5,66	3,84	2,64	4,29	1,83	4,42	2,14	141,160]
Бромат натрия	3,34	4,08	2,13	3,93	2,41	3,87	2,32	48]
Бромистый:								
аммоний	2,44	3,72	1,68	3,41	2,25	3,30	2,08	
калий	2,75	3,55	1,36	3,02	2,29	2,84	2,19	
натрий	3,20	3,48	1,74	3,26	2,13	3,18	2,01	[141]
серебро	6,48	2,95	1,05	2,83	1,34	2,79	1,25	[141
таллий	7,45	2,40	1,14	2,12	1,28	2,07	1,16	[149]
	4,46	2,636	1,30	2,47	1,299	2,41	1,50	[48, 141,148]
	6,02	6,15	2,66	5,99	3,011	5,93	2,90	[48, 141]
Банадосульфат таллия	6,22	2,81	0,873	2,46	1,6			169]
Вольфрам	19,2	5,11	2,81	5.11	2,81	5,11	2,81	141]
Галенит	7,5	4,11	1,82	3,71	2,55	3,56	2,33	48]
		3,69		3,56	2,07	3,52	1,99	141]
Германат висмута	9,23	3,65	1,68	3,39	1,67	3,36		
					2,38			156-159]
Германий	5,33	4.92	3.55	5,41	2,75	5,56	3,04	
Гранат:								[141]
алюмоиттриевый	12,0	8,5630	5,0293	8,6016	4,9496	8,60		
			5,0311	8.6167				[135,161,162]
железоиттриевый	5,18	7,0800	4,0601	7,172	3,902	—		
			3,843					[162-164]
галлиево-иттриевый	5,79	7,08	4,06					
«-Железо	7 86	5,55	3,77	6,24	2,46	6,46	2,97	[135]
Золото	19^3	3,10	1,47	3,33	0,866	3,39	1,10	1??п
Йодистый:								
калий	3,13	2,92	1,16	2,51	1,89	2,33	1,68	(141J
натрий	3,67	2,667	1,304	2,374				
		2,83	1,42	2,66	1,73	2,60	1,62	[48, 1661
цезий	4,51	2,326	1,17	2,21	1,39	2,16	1,32	[48]

Продолжение табл. **9.10**

	Плотность. 10», кг/м»	*V.* 10> м/с						
		L,oo	S,,,,,	X-ю		Lui	S,,,	
Калий (—190° С)	0,91	2,24	1,70	2,73	0,68	2,88	1,13	141)
Кремний:	2,33	8,43	5,84	9,13	4,67	9,35	5,09	1431
KRS-5	7,37			= 2,078*;	= 0,874*			1671
KRS-6	7,19	2,416		2,2170	1.0278 i	—	—	
Литий (—195°q	0,55	5,19	4,43	6,67	1,41	7,09	2,82	
Литий — индий	5,16	3,29	2,27	3,82	1,17	3,76	1,62	
Медь	8,94	4,34	2,90	4,96	1,62	5,16	2,14	
Молибден	10,19	6,72	3,29	6,48	3,73	8,19	2,39	
Натрий (—183° С)	1,01	2,44	2,41	3,31	0.84	3,58	1,55	[141
Никель	8,90	5,26	3,74	6,01	2,36	6,24	2,90	[1411
Оксид:								
бария	5,72	4.6921	2,4422	4,5326	2,60	4,61	2,57	
магния	3,58	8,94	6,43	9,66	5,27	9,89	5,68	1411
Палладий	12,13	4.28	2,43	4,73	1,42	5,06	1,86	481
Свинец	11,34	2,03	1,13	2,25	0,57	2,32	0,80	1411
Селенит цинка	5,42	4,07	*2,73*	4,55	1,82	4,75	2,19	48, 152]
Серебро	10,49	3,41	2,07	3,79	1,20	3,92	1,55	141]
Силикат висмута	9,21	Q «Q						1681
Силикатное железо	7,19	5,68	4,33	6,76	2,30	7,09	3,13	
Стронций азотнокислый	2,99	3,98	2,21	4,05	2,07	3,79	2,12	48
р-Сульфид цинка	4,10	4,90	3,31	5,5	2,09	5,74	2,56	48
Теллурит:								
ртути	8,08	2,58	1,62	2,87	1,03	2,96	1,26	
кадмия	5,85	3,02	1,87	3,34	1,20	3,44	1,46	
Титанат стронция	5,12	7,876	4,910	8.098	4,918	8,141	4,703	
Торий	11,66	2,54	2,02	3,07	1,06	3,22	1,45	[141]
Феррит кобальтоцинковый	5,43	7,00	3.80	7,28	3,23	7,37	3,42	[48]'
флюорит (плавиковый шпат)	3,18	7,19	3,30	6,68	4,24	6,50	3,95	[141]
Фосфид галлия	4,13	—	4,13	6,32	-	-	-	(1501
Фтористый:								
барий	4,89	4,3	2,2	4,3	2,3	4,3	2,3	[153]
литий	2,64	6,63	4,90	7,40	3,54	7,60	4,16	[141, 144]
магний	3,98	6,64	3,72		4,16	—	—	[48, 135]
натрий	2,79	—			5,66*;	= 3,33*		[165]
Хлорат натрия	2,49	4,47	2,17	4,18	2,68	4,09	2,52	[141]
Хлористый:								
калий	1,99	4,52	1,77	3,89	2,9	3,61	2,59	[141, 144]
натрий	2,17	4,79	2,44	4,'50	2,92	4,45	2,78	[144, 145]
серебро	5,57	3,29	1,06	3,13	1,47	3,07	1,35	[141]
	3,99	3,04	1,42	2,78	1 ,85	2,69	1,71	[48, 148]

Направление распространения волиы не указано.

Таблица 7.18. Скорость звука в гексагональных кристаллах (f гк 20° С)

Кристалл	10» кг/м=	1, 10» м/с					Литература
		^100			^001 ^100	Другие кристаллографические направления	
Бериллий	1,87	12,25	13,41	9,11	9,10	12,7 (Loii); 9,04(S%^)	[48. 141]
Ванадат-германат свинца	7,15	-	3,45	1.54	—	3,1l(Loio), 1,66(S™),	[48, 170]
	—	—	3,427		—	1.49 *(SZ)*	
Ванадат-силикат свинца	7,02	—	3,62	*1,73*	—		[48]
Иодат лития	4,5	4.13	4,3	1,99	—		(48, 171]
Иттрий	4,48	-	4,14	2,33	-		[48]

Продолжение табл. **9.70**

Кристалл		i, IO^M/c					Литература
		^100	^001	произв "OOl	•^100	Другие кристаллографические направления	
Кадмий	8.64	3,56	3,74	1,46	1,46	2,44; 2,33(Lou)	[48,141]
		3,74	–	1,34	1,34	2,01; 2,05 (5 Э	
Канкринлт	2,42—2,48	.	5,81	3,12	–		148]
Р-Кварц(580°С)	2,53	–	6,61	3,78	–		[48]
Кобальт	8,79	5,91	–	2,93	2,93	6,38 (LoiJ: 2.84	[141]
Лед (-16° С)	0,94	3,83	.	1,84	1,84	3,99 (Looi); 1 . 9 0 (0	[141]
Магний	1.79	5,84	-	3,06	3,06	5,94 (L„„); 3,09 (S««)	[1411
Оксид цинка	5,64	6,0776	6,0961	2,7353	2,7350		[172]
Ортоселеноарсенит таллия	7,83	–	2,10	1,21	–		[169]
Рении	20,53		5,92	2,87	–		[48]
Рутений	12,1	-	7,28	3,95	–		[48]
Селенид кадмия	5,68	3,630	3,856	1,521	1,592		[173]
Сульфид:							
кадмия	4,82	4,181	4,414	1,757	1,7565		[151, 174]
цинка	4,1	5,512	5,582	2,647	2,652		(173]
Титанат бария	5,5	–	5,50	2,79	-		[48]
Цинк	7,18	4,73	–	2,31	2,31	2,92 (Loii): 2,97 (SZ)	[141]

Таблица 7.19. Скорость звука в тетрагональных кристаллах

		V. 102 м/с										Литература
		^100	Ч ю	Ч01	Ч ю	„010 •^100	^001 •^100	„100 •^010		<110	„100 ^110	
Бастрон, ниобат бария-стронция ^"(0,75-0,5) Ba(0,25-0,5)Nb2O6	5.4	.	–	5,5	–	.	.	.	.	.	.	[151]
Дигвдрофосфат аммония NH4H2PO4	1,80	6,15	—	4,35	—	1,83	–	–	–	–	–	[151,176]
Каломель HgaCla	6,97	1,6224	—	3,3434	—	1.3054	—	–	–	0,3471	–	[177]
Молибдат свинца PbMo04	6,95	3,98	–	3,632-3,750	–	2,20	1,961-1,980	–	–	–	–	[178—182]
Парателлурит TeO^	5.9	3,051	–	4,14-4,30	–	3,317	2,100	—	2,08	0,616—0,618	—	[181. 185—188]
Рутил TiOg	4,28	7,929—8,014	7,929—7.958	10,94	9,935—9,950	6,756	5,424	6,700	5,399	3,300	5,389	[181,183. 184]
Титанат свинца PbTiOs	7,95	–	–	4.19	–	–	–	.	–	–	—	[189]
TllnSe^	7,18	2,48	2,48	2,48	—	1,35*		–	–	–	–	[169]
TlGaSe,	6,34	3,25	—	2,67	–	0,767*		–	–	–	–	[169]
TlGaSa	5,72	3,0	-	2,5	-	1, 0*		-	-	-	–	[169]

^ Поляризация не указана.

Таблица 7.20. Скорость звука в тригональных кристаллах — 20° С)

и, Ю' WC

		hov					C		<100.010	•^010		Литература
Германат свинца	7,29	**3,01**	–	**3,47**	–	–	**1,67**	–	–	–	–	**[190]**
Кварц	2,65	**5,747-5,7509**	**6,0061-6,0070**	**6,318-6,325**	**3,2978**	**5,1145**	–		**4,687—4,6895**	**3,9158-3,9169**	**4,3207-4,3249**	**1137, 191-194, 196]**
Киноварь	**8, 10**	–	–	**2,450**	–	–	–	–	–	–	–	**[197]**
Ниобат лития	4,62	**6,54-6,54873**	**6,829-6,8822**	**7,271 —7,3328**	**4,034-4,0593**	**4,76—4.8012**	**3,94-3,9615**	**4,457-4.4943**	**3,57-3.59**	**4,46-4,46667**	–	**[198-204, 209]**
Прустит	5,63	**3,2**	**2,98**	**2,60**	–	–	–	–	**1,28**	**1,50**	–	**[204]**
Сапфир	3,97	**11,03-11,235**	–	**11,15**	**5,72**	**6,780**	–	–	–	–	–	**[205-207]**
Теллур	6,25	**2,41**	–	**2,3**	–	–	**1,47***					**[135-208]**

Поляризация не указана.

Таблица 7.21. Скорость звука в ромбических кристаллах

Кристалл	Ю= кг/м=	t', Ю» м/с							Литература
		^100	*Чю*	^001	^010 •^100	•^100	C	Другие кристаллографические направления	
Банан, ниобат бария — натрия	**5,41**	**3,365**	**3,415**	**3,075**					**[210]**
Бифталат:									
калия	**1,64**	**3,382**	**2,892**	**3,347**	**1,996**	**2,137**	**1,774**		**211]**
рубидия	**1,93**	**3,21**	**2,68**	**2,85**					**212]**
цезия	**2,18**	**3,27**	**2,51**	**2,54**					**212]**
Германат лития	**3,50**	**6,50—6,66**				**3,72—3,75**	**4,04—4,10**	**2,24* (Sooi-)**	**213, 214]**
Германат натрия кобальта		**5,54**	**5,26**	**5,43**	**3,23**				**[215]**
Дигидрофосфат калия	**2.34**	**5,41-5,50**		**4,86**		–	—		**[151]**
Йодноватая кислота	**4,63-5.00**	**3,65**	**2,89**	**2.44**	**1,84**				**[216]**
Молибдат гадолиния	**4,58**	**3,368-3,900**	**3,853 3,995**	**4,646**	**2,340-2,708**		**2,349-2,360**	**4,500 (£„o); 4,135(Li,o); 2,383* (Sooi); 2,360* (Sooi)**	**[217—219]**
Ортоселенофосфат таллия	**6.1**	**2,2**	**2,2**	**2,2**		–			**[169]**
Ортосульфатарсенид таллия		**2,15**						**1.21* (Soox)**	**[214, 220]**
Сульфоиодид сурьмы	**5,25**	**2,1 — 2,7**							**[221]**
Таиталат лнтия	**7.45**	**5,550-5,5522**	**5,6917**	**6,160-6,476**	**3,3556**	**4,210**	–	**3,529 (O**	**[147, 150, 198-200]**

Поляризация не указана.

Таблица 7.22. Скорость распространения поверхностных акустических волн

Кристалл, точечная группа	Срез (плоскость)	Направление распространения	Скорость VJf, 10 м/с	*Avj^/vf*. 10-0	
Арсенид галлия, 43т	***Z***	100	2,719	0; 1,18	
		по	2,863	—	
		Х4-25°	2,750	3	
		X+23°	2,760	2,85	
		110+45°	2,480	—	
	X	100	2,332	—	**[226]**
		010	2,720	0	227
		ПО	2,773	8	226
		Oil	2,8645	3,40	227
		210	2,725	70	[226
	XY	001	2,819	1,16	**[222**
		100	2,542	13	[226]
			2,820	0,95	[2271
		110	2,399	—	
			2,512	19	
		П1	2,694	62	**226]**
	111	110	2,428		
		112	2,525	—	***m***
		2TI	3,0826	0	***1227]***
	211	111	2,621	1.2	[248]
Антимонид индия, 43п1	***Z***	100	1,84		**[228]**
	X	F+45°	3,32	12	[228]
	Y	001	3,177	5	[227]
		100	3,46	0	[227]
Берлинпт, 32	***X***	y+19°	2,754	24	
		F+175,2°	2,865	26,4	
Борат лития	***X***	001	3,51	40	[135]
Ванадосульфат таллия, 43ш	***X***	100	0,870	—	[169]
Галлат:					
висмута	***X***	110	1.61	к = 1,76%	
лития	***X***	010	3,173	55	231]
Германий, тШ	***Z***	100	2,934	0,1	155]
	XY	001	3,015	0,1	1551
	111	110	2,683	—	
Германат висмута,	***Z***	110	1,681	68	
		100	1,620	0	[223]
		Х+30°	1,654	55	
	XY	001	1,5935	22	
			1,620	37	
	111	по	1,7812	0	227!
		110	1,708	82	[232]
лития,6	X	001	1,909	26,2	[234]
	z	100	2,258	443	
	X	010	3,256	—	[235, 236]
Кварц, 32	***Y***	100	3,154	—	[235 , 236]
			3,159	9	
	Z	010	3,258	—	[232I
			3,2617	—	[228]
	YX		3,1616	—	238]
	ST	iOO	3,158	5,8	232]
				6.7	247]

Продолжение табл. **9.10**

	Срез (плоскость)	Направление распространения	Скорость Vjf, 10^ м/с	*Av^/vj^.* 10-i	
Кварц плавленый	—	–	3,411	-	[223]
Керамика:					
ЦТС-23			2,253	—	[238
ПКР-2			1,8507		238
РТ-4			2,2	220	135
Кремний, *mЪm*	*z*	100	4,92	—	**228**
Молибдат свинца, 4/т	*X*	010	1,457	–	135]
	Y	100	1,458793	–	248]
	Z	100	3,798	260	
Ниобат лития, 3т	*X*	001	3,483	252	[227 , 239, 240]
	Y	001	3,488	241	[227, 239, 240]
	Y+16,5°	100	3,503	268	[232
	К + 41,5°	100	4,000	277	
	К+127,86°	100	3,950	–	**[1**
Оксид:					
магния, *mЪm*	*Z*	100	5,513	120	
	XY	001	5,640	118	**[itll**
	111	п о	5,114	—	241]
цинка, 6mm	X	010	2,8378	17,44	227!
		001	2,7524	0	227'
	Z	Любое	2,80	0	[227:
			2,64	45	[135:
Парателлурит, 422	*Z*	F + 40°	1,4		[242]
	X	ПО	1,673	S3	135]
Селен	*Y*	100	0,813	*k=l,7%*	135
		001	1,54		135
	Z	ПО	1,66	–	168
	111	ПО	1,61		168
Силикат висмута, 23	*XY*	110	1,748	/с= 1,5%	135
		001	1,601	4	135
	X	010	1,7302	0	[243
		001	1,7177	26,1	[243
	Y	100	1,700	–	**[222**
Сульфид кадмия, *Шm*		001	1,716	2,6	[223
		J-001	1,720	31	[235]
	Z	Любое	1,7308	23,6	[243J
Танталат лития, 3т	*Y*	100	3,148	3,7	232]
		001	3,230	33	227 , 232]
	Z	100	3,205	11,4	
		010	3,329	59	
	Z + 22°	100	3,302	27	[227! 232]
Танталоселенат таллия, 43т	Xi'	п о	0,85		[244]
		001	0,77	–	[244]
Титанат висмута _	*XY*	110 + 55°	1,72	fe=l,58%	[245]
фосфид галлия, 43т	*z*	100	3,37	0	[224]
		X + 23°	3,42	1,1	[224]
		X + 45°	3,09	0	
	X	010	2,827	23	
фресноит, 4mm	*Y*	001	2,50	5	
	Z	100	2,678	80	
	Z+45°	100	2,655	75	
Фтористый литий, mSm	*Z*		3,897	–	
	XY		4,060	–	
	111		3,458	–	
Хлористый калий, т3т	*z*	100	1,753	—	

k — коэффициент электромех

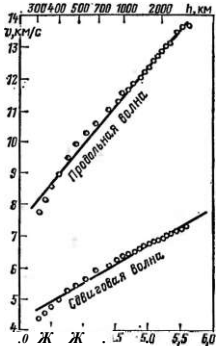


Рис. 7.27. Зависимость скорости звука в мантии Земли от глубины (плотности) [128]

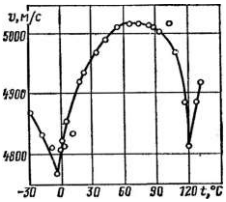


Рис. 7.28. Зависимость скорости звука от температуры в поляризованной керамике титаната бария (продольные колебания по толщине пластинки) [175]

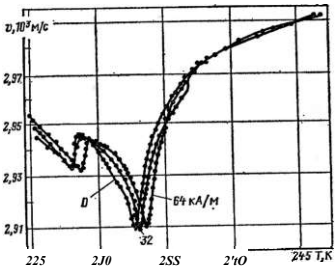


Рис. 7.29. Зависимость скорости продольной волны (30 МГц) вдоль гексагональной оси в тербии от температуры при разной напряженности магнитного поля: в области точки Кюри (-228 К) и точки Нееля (-233 К) [195]

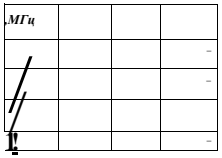


Рис. 7.30. Зависимость от напряженности магнитного поля резонансной частоты колебаний сдвига в пластинке естественного кристалла гематита (а—FejOa) fs — эффективная скорость; направление поля нормально к плоскости пластинки и совпадает с тригональной осью; «легкая плоскость» — в плоскости пластинки [249], см. также 1250]

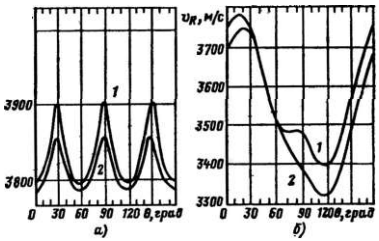


Рис. 7.31. Анизотропия скорости ПАВ в LiNbOj:
а — Z-срез, е — угол между осью *X* и волновой нормалью: *б* - А-срез: *в* - угол между осью У и волновой нормалью; *1* — *ша* свободной поверхности; 2 — на металлизнрованной поверхности [251]

Таблица 7.23. Затухание звука в природных материалах

Порода		Тип позбуждения	Q	Литература
Гранит (квинсли)	140—1600	Продольный резонанс	100	[253]
	140—1600	Кручение, изгибный резонанс	150—200	[253]
Гранит	50—120	Изгиб	57	[254]
	5 . 10^ 4 - 10®	Релеевские волны	79	[255]
Долорит	50—120	Изгиб	90	[254]
Диорит	50-120	»	125	[254]
Известняк	5 • 10®-^ 10'	Продольные импульсы	190—110	[256]
	3 - 10е.^ 15 • 10'	Сдвиговые импульсы	400	[256]
хантонский	(2,8^ 10,6) • 103	Продольный резонанс	65	[257]
соленхофенский	(3-^9)- 10в	Сдвиговые ИМПУЛЬСЫ	190	[256]
ракушечник	50—120	Изгиб	63	[254]
, оолитовый	50—120	»	45	[257]
Песчаник аМхерстовский	9 3 0 1 2 , 8 • 10»	Продольный резонанс	52	[254]
Песчаник	50 - 120	Изгиб	21	[254]
Покрывающие породы	(1,1 -^6,6) • 103	Продольный резонанс	45	[256]
	100 ^ 2 • 103	Сдвиговый резонанс	52	[257]
Сланец глинистый сильванский	(3,4 -4- 12,8) • 103	Продольный резонанс	73	[257]

Таблица 7.24. Затухание звука в металлах, стеклах и пластмассах

Вещество	Диапазон частот. Гц	Тип возбуждения	Добротность Q. 10-	*a-lf,* 1(Г' с/м	Литература
Алюминий	(3,1 7,5) • 106	**Продольные импульсы**	5,9	0,85	[258]
	(5-^15)-10"		7,63	0,64	
	(3,5^4,5)-10в	Сдвиговые импульсы	19,4	0,53	
	(3^6,8). 106		17,2	0,59	[ill]
монокристалл в направлении 110	(1-^200)-10°	Продольный резонанс	150	0,03	[259]
	(1,5-^6). 10'	Продольные импульсы	1,09	4,6	[260]
Латунь	10'	То же		70	[267]
	9-106	Сдвиговые импульсы		160	[267]
Магний	(2-^100)-103	Продольные волны	4,9	1,08	[258]
	(7-^76)-106	Продольные ИМПУЛЬСЫ	0,965	5,5	[262]
Медь:	10—18	**Продольное**	2,14	3,10	[263]
	(2,5 30) • 103	**Продольный резонанс**	2,18	3,10	[264]
	(2,5 ч- 30) • 108	Сдвиговый резонанс	4,38	3,20	[264]
	1 - 6	Изгиб	0,98	–	[265]
	11-25	»	0,64	–	[266]
неотожженная	(1,5-4-6,5). 10'	Продольные ИМПУЛЬСЫ	1,77	3.6	[260]
отожженная	**(2,54-7,5)-10'**	То же	5,83	1) 1	[260]
Молибден	**8-30**	Изгиб	0,465	–	[266]
Монель	8-32	»	1,40	–	[266]
Никель:					
монокристалл	10'	Продольные волны		1,0	[268]
поликристалл	**8-106**	Продольные импульсы	–	102	[267]
	2,5-106	Сдвиговые ИМПУЛЬСЫ	–	233	[267]
	12—33	Изгиб	0,96		12661
Органическое стекло	106	Продольные волны		250	
Плавленый кварц	(0,2ч-1,5)-10'	Сдвиговые волны		0,19	[111]
	5-108	То же		0,1	[150]
	(0,2ч-1,5)-10'	Продольные волны		1,23	258
	5-108	То же	–	0,7	150]
Полистирол	106	5,		170	256
Полиэтилен	106	»		520	256
Свинец	(1,6-15)-103	Продольное	3,6-10-2	400	264
	(1-9)-10®	Сдвиговое	3,4-10-2	1400	264
Сталь:	5-10	Продольное	5,0	1,0	263
	2—8	Изгиб	1,85		265
-f3,5%Ni	8—25		1,36		266
вольфрамоуглеродистая	(2—100)-103	Продольное		0,38	258
молибденовая	(2-100)-103		—	1,42	[258]
Стекло:					
пирекс	(2-^15). 106	Продольные волны		4,89	[258]
свинцовое	(2--15)-10'	То же		3,21	[258]

Таблица 7.25. Поглощение звука в кристаллах (f = 20° С)

Кристалл, сингония, точечная группа	Тип волны, направление распространения	дБ/МКС (f, ГГц)	10= дБ/м (/,ГГц)	
Антимонид индия, куб., 43 т[135, 317 , 274]	^-100	40(1) 8(0,5) 40(1)	4,8(0,11) 5,1(0,58)	
		3,8(1) 5(1)	4,5(0,58)	
		8{1)	8,8(0,58) 6,2(0,58)	
Арсенид галлия, куб., 43т 1135, 275]		**0,6(0,2)** 4,0(0,5) 0,7(0,2)		30(227]
Банан, ромб., *mm2* [276]			0,1 (0,077) 0,4(0,5) 250K	
	Вдоль ***a***		0,4(0,5) 250K	
Бастрон, тетр., 4mm [277, 135]			**61 (0,1)** ^1.0(0,5)	
Бифталат калия, ромб., 2т [212]	iioo ***Lorn***	1,1(0,4) 1,5(0,4)		
	iooi ^Sxoo f V o	0,68(0,4) 0,35 (0,4) 0,56(0,4)		
Бифталат рубидия, ромб., 2т[212]	***Lim*** ioio ioM	0,29(0,4) 0,90(0,4) 9,36(0,4)		
Бор, триг., 3т 1135]	iooi	0,15(1)		
Бромистый калий, куб., т 3 т |	bioa iuo ***Lni*** oOOl oOOl •-^100 -^ПО oIIo •^110 c 110			36* 25* 17* 6* 40* 38*
Гадолиний, гекс. [313]	i " .		13(0,05) 0,4 (0,05)	
	ilOO ***Lno*** ^-lu _	I 1.3(0,3) **i 11(1)** **10(1)** 4,2(0,5) **2(1)**	23(1)	29,6
	Sioo	0,29(0,3)	10<I)	
Германат висмута, куб., 23 [135 , 283]	ilOO iool ioio	0,11 (0,5)	2(0,025) 4(0,8) 4(0,8)	
Германат свинца, гекс., 6[151, 190]	ilOO imo iooi		2(0.1) ~30 (0,4)	150
Гранат: алюмоиттриевый, куб., т 3 т [135, 150, 206, 279, 282,	bioo	0,07(0,5) 0,6(1,5)	0,2-0,32(1)	

m

Кристалл, сингония, точечная группа	Тип водны, направление распространения	Г, дБ/мкс (*if*, ГГц)	Ю2 дБ/„,' (/, ГГц)	Ю^ дБ/(м • ГГц^)
		1.8(1.8) 5(3)		
	iuo **c**	15(9,4) 14(9,4)	—	0,25
	Suo	7(9,4) 0,36(1,5)	0,4(0,9) —	1,1 –
галлиевоиттриевый, куб., ***m3m*** **(135J**		0.7(1)		—
	•Siioo Siio	0,1 (1) 5.9; 18(9)	—•	– —
железоиттриевый, куб., ***m3m*** [135, 151, 279, 286, 312]	fuo = Iui ^100	1,0(1) 1,0(1) 0.6(1.5)	2(1) 3,2(1,12)	1,1
	Sloe	0,13(1)	0.34(1)	0,35
Германованадат свинца, гекс. ***6/m*** **[170]**	***Lom***	—	0,8(0,1 2.1 (0,3	
	Lmx	–	0.5(0.1 2,1 (0,3)	
Иодат лития, гекс., S f135, 171, 287]	***Lm***	1,1 (0,15) 9,1(0,15)	– **20** (o,oo: 36 (0,00 7,5(0,14)	—
	^100, ею oiOOl ^100, oic	**1**,6(0,15) **0**,29 (0,15)	– –	- –
Йодноватая кислота, ромб., 222 [135, 216]	**Й**	**0**,73(0,5) 0,61 (0,5)	2,5 (0,5)	—
Карбид кремния, гекс., 6mm [135]	***k z***	56(9.4) 50 (9.4) 22(9.4)	–	**E**
	^loie	19(9,4)	—	–
Kbw, триг., 32 1135, 206, 288,	***Lm*** ***Lm***	1.3(1) 1.7(1) 3,5(1,8)	— 1,3(0,7 3) 9.0(1.96) 26.3 (3.38)	3,25 [2891 4 2 [2891 3^0 (151]
	sZ Soio ***sZ***	– 3,5(1.8) – 1,65(1,5)	0,2 (0,5) – 2(1,01)	— – – –
KRS-5, куб., ***m3m*** [135, 292J		0,3(0.1)	-8(0,5)	
KRS-6, куб, ***m3m*** [293]	***L***	–	0,8(0,1)	—
Киноварь, триг., 32 [135, 197]	iooi	***7(1)***	4,55 (0.4) 7.1 (0,5)	
Кремний, куб., ***m3m*** [135, 274, 317]	ilOO	**7(1)** **7,1(1)**	7.6(1,03)	
	Lno ***L-ui***	**5(1)** **2.3(0.5)** **6(1)**	5,9(1,03)	6,5 [151]
	ƒ Z o	**1.4(1)** **1.6(1)**	**l A' i i .** 03)	–
Молибдат свиица, тетр., ***A/m*** [180, 181, 295]	***Uo*** ***Lool*** ^^	– 1,0(0,5) –	2.5(0.5) 0.3(0.1) 0,16(0,2)	— — –
Молибдат свинца двойной, 2/ш моноклин. [135, 296, 297]	***Lioo*** ioie ***Looi***	— –	4.2(0.3) -4(0,1) 2,5(0,5)	– –

	Тип волны, направление распространения		10= дБ/м (f, ГГц)	
Никель, куб., *mЪm* 1315|	i-uo		~5 (0,09)	
				-0,7(0,0058)	
		sooi		1,8(0,0095)	
		no		4,6(0,029)	
Ниобат лития, триг., 3гп [135, 158 , 202 , 203 , 209 , 294]		Z-ino		0,29(0,4)	
				1,39(1)	
				0,86(1)	
			0,065(0,5)	0,16(0,4)	
				0,78 (1)	
				0,71(1)	
				0,03(0,4)	
			0,03,0.5,	0,17(1)	
				0,32(1)	
				0,34(1)	
				0,17(0,4)	
				1,04(1)	
			0,07(0,5)	***FS*** **0,81 (1)**	
				1,71 (1,1)	
				4,98(2)	
				SS 0,66(1)	
				0,17(0,4)	
				0,96(1)	
		S„io		***FS*** 0,73(1)	
				1,05(1,1)	
				3,50 (2)	
				0.14(0.4)	
				1,13(1)	
				SS 1,24(1)	
				2,31 (1,1)	
				5.81 (1,74)	
		Sooi	5,0(2.3)	0,39 (0,4)	
				2,44(1)	
				4,3(1)	
Оксид:					
бериллия, гекс., 6mm [135]			1,3(1)		
магния, Kv6., т3т [135, 275, 279, 282 , 298 , 299 , 317]			3(1)	3,30(1)	
			4,5(1		
			1.5(1)		
		Ё	**1,0(1**		
		Ё	**1,0(0.2)**	0,04(0,1)	
			4,4(1)	15(1)	
		Sxoo	0,21 (1)	0,44(1)	
			0,6(1)		
			6,5(1)		
цинка, гекс., 6mm [275]		**S**	0,5(0,2)		
Ортосиликат висмута, куб., 43т [283]		***Lrn***			0,95
		S??'			0,75
Парателлурит, тетр., 422 [135]			3(1)		6,5** [297]
		oi7o	**18(1)**		
		'^no			16** [297]
Пираргириг, триг., 3т [300]		/-100		,3(0,003)	
Прустит, триг., 3т [301, 302, 135]			1,5(0,56)		
			0,25(0,05)	-8(0,5)	4,5** [297]
		Looi	2,5(0,56)		

Продолжение табл. **9.10**

Кристалл, СШГОНИЯ, точечная группа	Тип волны, направление распространения	дБ/мкс (f, ГГц)	№ дБ/м (f, ГГц)	
Рутил, тетр., *i/mmm* [135, 141, 150, 206, 303]	Lioo	1.9(1)		
	'C	2,5(1)		
		0,1(0,5)	0,5(0,5)	
		0,6(1)		
		7(1,8)		
	Sooi	0,22(1)	3,4(2,8)	0,55 [151]
Рубии, триг., *3m* [305—307]	*L*	0,2(0,6)		
		19 (9,4)		
	i -	15(9,4)		
Сапфир, триг., *3m* [135, 150,206]		0,05(0,5)		
		1(1,8)		
		16,5(9)		
				0,2 [151.
	ioooi	**0.22(1)**		0,2 [151,
	FQSWa		0,5(1)	
		{1.4(1)	2,3(1)	
	QL\\a		**0,2(1)**	
Селенид:				
кадмия, гекс., *6mm* [135, 275]	iooоi	3,0(0,2)		
	^1010	0,5(0,2)		
		2,0(0,2)		
ртути [318]	Liio		~3 (0,075)	
	Si		2 (0,075)	
Силикат висмута, куб., 23	***Ьги***		5 (0,8)	
	SZ		**2(0, 8)**	
Сульфид кадмия, гекс., *6mm* [135, 275]	***Ьш***			I [1511
	iocol	3,5(0,2)		
		80(1)		
	i11 20	17(1)		
		0,6(0,2)		
		4,5(1)		
Сфалерит, куб., 43т [1513				27
				130
Танталат:				
калия, триг., *3m* [314]		0,45(0,18)		
лития, триг., 3т[135. 147, 150. 181, 294]	L103	0,02(0,5)	0,1(0,5)	0,1 [150]
		0,01 (0,5)	0,02(0.5)	
		4,4—6(2,3)		
Теллур, триг., 32 [135]	iIO«		3—5(0,5)	
Титанат строиция, куб.5 *m3m* [155, 310]	I1., ***tm***	**1(1)**	1,7(0,894)	
	i i u		1 (0,972)	
	•Sion		1,5(0,894)	
	Sue		1,1(0,77)	
Турмалин, триг. *3m* [135]	bool	16(9)		
Флюорит (плавиковый шпат), куб., /л3/л [153]	i11.	0,4 (0,5)		
		0,4(0,5)		
	pc"'	0,6(0,5)		
		0,3(0,5)		
Фосфид галлия, куб., 43т [150,		0,63 (0,4)		
		1 (0,5)		6 [311]

Продолжение табл. 7.14

я, точечная группа		10^ дБ/м (/, ГГц)
фтористый:		
барий, куб., *m3m* [135, 153]		0,16(0,2)
		0,16(0,2)
		0,9(0,5)
		0,5(0,5)
литий, куб., *mЪm* [141, 317]		3,5(0,9)
		10(1)
		1,3(0,9)
		2,5(1)
	Liii	0,8(0,9)
		1,5(1)
	SMO	0,8(0,9)
	Suo	0,8(0,9)
	S m	5(0,9)
магнии, тетр., *4/mmm* [135]	***Looi***	0,7(0,5)
	oIOO	0,45(0,5)
	⇐'001	14(1)
натрий, куб., *m3m* [317]	iloo	6,5(1)
	Iiio	10(1)
	Liii	**1.0(1)**
	S??'	**12(1)**
стронций, куб., *m3m* [153, 312]		0,7(0,5)
		2,5(1)
		0,5(0,5)
		0,6(0,5)
Хлористый:		
калий, куб., *m3m* [278]	***Lim***	
	1110	
	i m oOOI <jOM	
вагрий, куб., *m3m* [135, 312]	iloo	3,6(0,2)
		30(1)
	/.11»	0,56 (0,2)
		20(1)
	1111	0,28(0,2)
		10(1)
	o 001 oOOI •^100» '"^ПО	

Таблица 7.26. Затухание релеевских поверхностных волн в кристаллах

Кристалл	Срез (плоскость)	Направленве распростр-нения	г. дБ/МКС (f, ГГц)	Е. Ю^^дБ/м, иа частоте. ГГц [233, 234, ЗЗП			
				0,!	0,2	0,4	
Арсенид галлия	211	III	3,62(1) [248]	—	—	—	
	ПО	100	4,22(1) [135]	–	–		–
	001*	110	12,8(1) [135]	–	–	–	–
Банан	***Y****	001	3,7(1) [135]	–	–	–	–
Германат висмута	001*	**ПО**	1,64(1) [248]	0,199	0,571	1,832	9,756
	111	**ПО**	1,64(1) [248]	–	–	–	–
	111	ПО		0,199	0,571	1,832	9,756
Иодат лития	Z	Любое	450(1) [135]	–	-	–	-
Кварц			0,41 (0,316) [332]				
	Г**	100	4,1 (1,047) [332]	0,211	0,558	1,661	**8,244**
							8,220
			2,6(1) [248]				
	ST	100	3.09(1) [248]	0,232	0,630	1,897	9,733
							9,780
Ниобат лития	***X***	001	1,1—1,78(0,9) [332]	0,079	0,210	0,621	3,06
			3,84 (1,95) [332]				3,04
	Y	100	0,93(1) [227]		—		
		001	1,07(1) [227]				
	F+16,5°	100		0,086	0,227	0,669	3,28
	F + 41,5°	100		0,093	0,225	0,600	2,'62
	Z-41,5°	100	1,05(1) [227]	–		–	
Молибдат свинца	***X***	010	7.5(1) [135]	–	–	–	—
Оксид цинка	***Z***	Любое	37(1) [135]	–	–	–	—
Пьезокерамика PZT-4	–	Любое	6(0,036) [135]	–	-	–	-
Таиталат лития	z	010		0,092	0,230	0,646	3,004
	Y	001					

*r=l,45f^' +0.19f[135].
r = 2,l5f' + 0.45f [135].
r = 0,88f'^' + O.lgf [135],

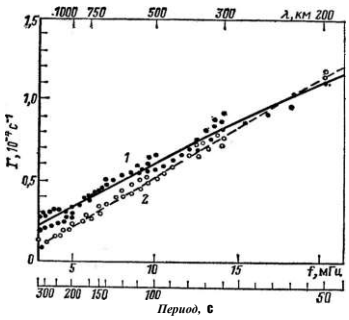


Рис. 7.32. Коэффициент затухания Г сейсмических волн Лява (/) и релеевских волн (2) в зависимости от периода (частоты, длины волны). Данные получены после обработки записей серии землетрясений [252]

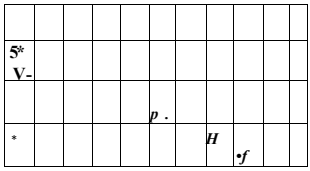
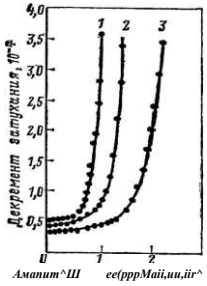


Рис. 7.33. Добротность продольных колебаний алюминиевых стержней в зависимости от частоты [259]

Рис. 7.34. Добротность низкочастотных резонаторов из различных материалов: О — алюминиевый сплав (Al-5056); Д - Nb [269]; П - Si [270]; V —AljOs [271]. Темные значки — Т-300 К, светлые —

10 10^ 70' W'^fju.



*Амапит^Ш ее(pppMaii,uu,iir^*

Рис. 7.35. Амплитудно-зависимое затухание в алюминии при <=84"С: 1 — неотожженный образец; 2 — отжиг (время возврата 3,5 ч); 3 — отжиг (13.5 ч) [272]

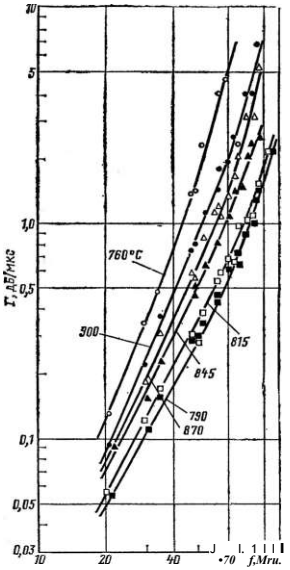
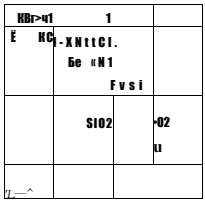


Рис 7 36 Затухание продольных воли _ штампованной стали (образцы аустенизированы при различной указанной температуре) [273]



Температура. ДеШ, К

Рис. 7.37. Коэффициент затухания продольных волн (1 ГГц) при 7=300 К как функция температуры Дсбая. Направление распространения /.-волны: кубические кристаллы - [100], SiO^ - *X;* TlOr и AljOj - с [319]

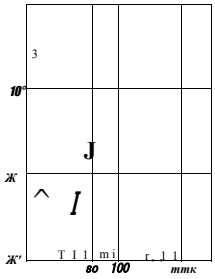


Рис 7.38. Зависимость затухания в кристалле MgO от температуры (5,со-волна, 3 ГГц) [319]

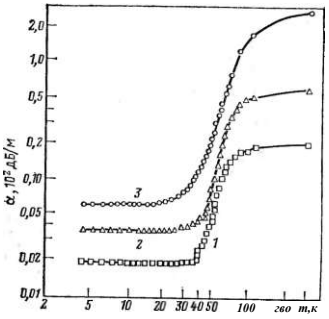


Рис. 7.39. Зависимость затухания звука на частоте 1 ГГц в АЬОз от температуры для воли, распространяющихся вдоль оси *а:*

поперечные вол-

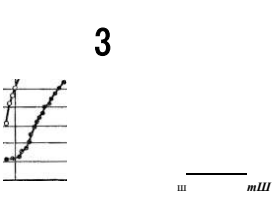


Рис. 7.40. Затухание /.-волны вдоль тригональной оси кристаллов рубина и ниобата лития (9,4 ГГц) [321]

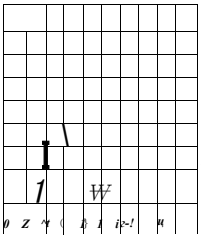


Рис. 7.42. Поглощение 1-волны (10,3 МГц) в Чистом олове ,в области перехода в свер?споводящее состояние: пуктир — поглощение в нормальном состоянии [323]

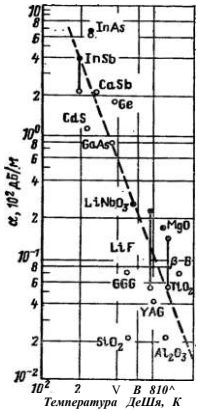


Рис. 7.41. Остаточное поглощение (1 ГГц) в зависимости от температуры Дебая [322]:
О — L-ВОЛН; * — S-волн

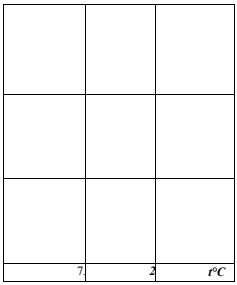


Рис. 7.43. Поглощение L-волны (10 МГц) вдоль оси с кристалласульфоиодида сурьмы при различном сопротивлении образца [324]:
О-10» Ом; «"-г-Ю» Ом; х - 3 - О м [324]

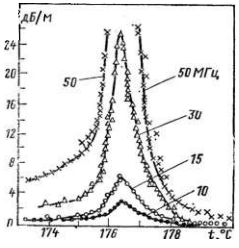


Рис. 7.44. ЗаВiicНМ0СТЬ от температуры коэффициента поглощения /.-волны вдоль оси У в германате свинца Г325]

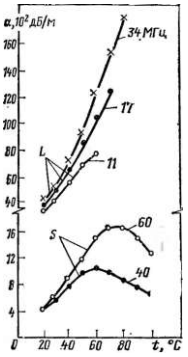


Рис. 7.45. Затухание пьезоактивных сдвиговых (S) и продольных (L) вoли в иодате лития. SJ_c,L||c [326] (см. также [327])

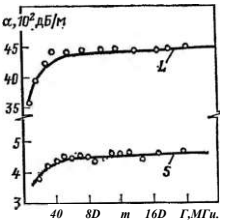


Рис. 7.46. Затухание при <=20° С пьезоактивных сдвиговых и продольных волн в иодате лития [326]

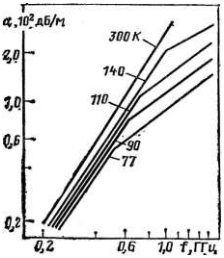


Рис. 7.47. Частотная зависнмость поглощения SSiio-волны в ft-кремнии. Излом :оответстБует переходу от затухания Ахиезера к затуханию Ландау-Румера [328]

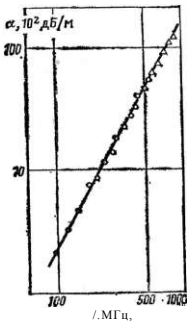


Рис. 7.48. Частотная зависимость затухания SSHO-ВОЛНы в параТеллурите (а=ао Г®, где ао=3.6-10-2 дБ/м, f в МГц; [329]

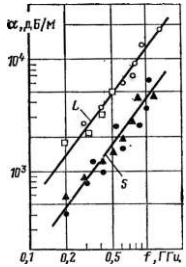


Рис. 7.49. Неэлектронное затухание L- и S-волн в сульфиде кадмия при 300 К. Волны распространяются под разным углом к оси с: О, • —40°; » —0°; А — 90° [330]

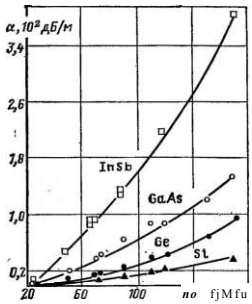


Рис. 7.50. Частотная зависимость поглощения в кремнии, германии, арсениде галлия, антимониде индия при 300 К Lno-волны. Концентрация примесей в Si и Ge: 10" см-з As; в GaAs: 3-10" см-^ Te, в InSb: 2-10'б СМ-® Te [160]

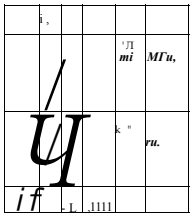


Рис. 7.51. Поглощение поверхностной волны на У-срезе кварца на разной частоте (волны распространяются в направлении [ЮО]) 1333]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1985.

2. Eder F. X.//Mod. Messmethoden Phys. 1960. Bd 1; Petrallia S.//Nouvo cimento Supp. 1952. Vol. 9. P. 1—12.

3. Blythe A. R.//Acoustica. 1965—1966. Vol. 16. P. 118—121

4. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с нем./Под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. М.: Изд-во иностр. лит. 1956.

5. Kneser H. 0.//Ergeb. Exakt. Naturwiss. 1949. Bd 22. S. 121—127; Nomoto O. Ultrasonic waves. Tokyo. 1940; Petrallia S.//Nuovo cimento. 1951. Vol. 9. P. 1—8,

6. Hardy H. C., Telfair D., Pielemeier W. H.//J. Acoust. Soc. Amer. 1942. Vol. 14. P. 226—232; Pielemeier W. H., Hardy H, C.//Ibid. 1941. Vol. 13. P. 80—84.

7. Penman H. L.//Proc, Phys. Soc. 1935. Vol. 47. P. 543—548.

8. Quigley Th. H.//Phys. Rev. 1946. Vol. 67. P. 298—302.

9. Sherratt G. G., Griffiths E.//Proc. Roy. Soc. 1934. Ser. A. Vol. 147. P. 292—297.

10. Overbeck C. J., Kendall H.C. //J. Acoust. Soc. Amer. 1941. Vol. 13. P. 26—31.

11. Бачинский А. И., Путилов В. В., Суворов И. П. Справочник по физике. М.: Учпедгиз. 1951.

12. Beyer R. T.//J. Acoust. Soc. Amer. 1951. Vol. 23. P. 176—181.

13. Hodge A. H.//J. Chem. Phys. 1937. Vol. 5. P. 974—977.

14. Воларович М. П., Балашова Д. Б.//Примеиение ультраакустики для исследования веществ. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 13. С. 63—68.

15. Henderson M. C., Peselnick L.//J. Acoust. Soc, Amer. 1957. Vol. 29. P. 1074—1078.

16. JVleyer £., Sessler G.//Z. Phys. 1957. Bd. 149. S. 15-20.

17. Itterbeek A., Mariens P.//Physica. 1937. Vol. 4. P. 609—615.

18. Keller H. H.//Z. Phys. 1940. Bd 41. S. 386—392.

19. Вайтонис В. В., Яковлев В. Ф.//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 296—301.

20. Itterbeek A., JVlariens P.//Physica. 1938. Vol. 5. P. 1533-1537; Vol. 7. P. 938-942, 909-913, 125-127; Itterbeek A., Thys L.//Physica. 1938. Vol. 5. P. 889—892, 298—302, 640—642.

21. Красиушкин П. Е.//**ДОКЛ.** АН СССР. 1940. Т. 27. С. 214—217; Phys. Rev. 1944. Vol. 65. P. 190—193.

22. Медников Е. П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР. 1963.

23. Evans E. J., Bazley E. N.//Acoustica. 1956. Vol. 6, P. 238—241; Pohlmenn W.//Proc. 3th Intern. Congr. Comm. Acoustics. Stuttgart. 1959. Vol. 1. P. 532—537.

24. Sivlan L. J.//J. Acoust. Soc. Omer. 1947. Vol. 19, P. 914—919.

25. Liepmann H. W.//Helv. Acta. 1938. Bd 11. S. 381-384; 1939; Bd 12. S. 421-425.

26. Gupill E. W., Hoyt C. K., Robinson D. K.//Canad. J, Phys. 1955. Vol. 33. P. 397—402.

27. Beyer R. T.//J. Chem. Phys. 1951. Vol. 19. P. 788—793.

28. Pitt A., Jackson W. J.//Canad. J. Phys. 1935. Vol. 12. P. 686—690,

29. Itterbeek A., Forrez G., Teirlinck iW.//Physica. 1957. Vol. 23. P. 905—908.
30. Findley J. C., Pitt A., Grayson S. H. e. a.//Phys. Rev. 1938. Vol. 54. P. 506—508; 1939. Vol. 56. P. 122-125; Chase C. E.//Proc. Roy. Soc. 1953. Vol. A220. P. 116-120.
31. Peilam J. R., Squire C. F.//Phys. Rev. 1947. Vol. 72. P. 1245-1249; 1947. Vol. 71. P. 477—481.
32. Пешков В. П.//ДОКЛ. АН СССР. 1944. Т. 45. С. 385-388; Лившиц Е. М., Пешков В. П. Там же. 1945. Т. 47. С. 117-121.
33. Михайлов И. Г. Распространение ультразвуковых волн в жидкостях. М.: Гостехиздат. 1949.
34. Gait J. K.//J. Chem. Phys. 1948, Vol. 16. P. 505-509.
35. Noury J.. Lacam A.//J, Phys. Rad 1954. Vol. 15. P. 301-304.
36. Landolt-Bornstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Tecnik. Neue serie. Grupре 11. Bd 5. Molecularakustik. W. Schaffs, Heidelberg: Springer-Verlag. 1967-
37. Parthasarathy S.//Proc. Ind. Acad. Sci. 1935. Vol. A2. P. 497—500; Vol. A3. P. 285—287, 482—485, 519—620, 544-546; 1936. Vol. A4. P. 59—62. 213—217; Current Sci. 1937. Vol. 6. P. 213—215.
38. Schaffs W.//Z. Phys. 1939. Bd 114. S. 110—115; Z. Phys Chem. 1944. Bd 194. S. 28—32; Z. Naturforsch. 1948. Bd 3. S. 396—401; Z. Phys. Chem. 1951. Bd 196. S. 397-402.
39. Freyer E., Hubburd ***S. C.,*** Andrews D.//J. Amer. Soc. 1929. Vol. 51. P. 759—767.
40. Schaffs W., Nutsch-Kuhnkles R.//Acoustica. 1965—1966. Vol. 10. P. 66—69.
41. Lagemann R. T., Millan D. R.i Woolf W. E.//J. Chem. Phys. 1949. Vol. 17. P. 369-373.^
42. Willard G. W.//J. Acoust. Soc. Amer. 1947. Vol, 19. P. 438—443.
43. Greenspan M., Tschiegg C.//Ibid. 1959. Vol. 31. ***P.*** 75-80.
44. Zeifen N.//Z. Phys. 1938. Bd 108. S. 681—687.
45. Lagemann R. T., McMillan D. R., Woosley M.// J. Chem. Phys. 1948. Vol. 16. P. 247—249.
46. Baccaredda M., GiacominI A.//Ricerca Sci. 1964. Vol. 16. P. 611—613; Att. Acad. Naz, Lincei. 1946. Vol. 1, P. 401-405.
47. Цветков В., Маринин В.//Докл. АН СССР. 1949. Т. 68. С. 49 -52.
48. Шутилов В. Л. Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во ЛГУ. 1980.
49. Seifen N.//Z. Phys. 1938. Bd 108. S. 681—686.
50. Weissler A.//J. Chem. Soc. Amer. 1948. Vol. 70. P. 1634-1639.
51. Kuhnkles R., Schaffs W.//Acoustica. 1963. Vol. 13. P. 407-411.
52. Pancholy M., Paude A., Parthasarathy S.//J. Sci. Ind Res. 1944. Vol. 3. P. 5—10, 111—114, 159—162, 263-264, 354—357.
53. Бражников Н. И. Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества. Ультразвуковые методы/Под ред. Н. Н. Шумиловского. М.-Л.: Энергия. 1965.
54. Wilson W. D.//J. Acoust. Soc. Amer. 1951. Vol. 23. P. 1067—1072; Секоян С. С.//Измерительная техника. 1963. № 4. С. 51—55; Del Grosso V. Д., Mader C. W.// J. Acoust. Soc. Amer. 1972. Vol. 52. P. 1442—1446. Илгунас В., Яронис Э., Сукацкас В. Ультразвуковые интерферометры Вильнюс: Мокслис. 1983.
55. Seemann H. J., Klein F. K.//Z. Angew. Phys. 1965. Bd 19. S. 368—372.
56. Вьюгов П. Н., Гуменюк В. С.//Укр. физ. журн. 1966. Т. 11. С. 440-445.
57. Bockris O. M., Richards N. E.//Proc. Roy. Soc. 1957. Vol. A241. P. 44—51.
58. Ходов З. Л.//Физ. металлов и металловедение. 1960. Т. 10. С. 722- 725.
59. Веббер Дж., Стефеис Р. Физическая акустика/ Под ред. У. Мэзона; Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова, В. А. Шутилова. М.: Мир. 1970. Т. IV. Ч. Б.
60. Kleppa O. J.//J. Chem. Phys. 1950, Vol. 18. P. 1331—1335.
61. Гитис М. Б., Михайлов И Г.//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 145 159.
62. Пронин Л. Д., Филиппов С. И.//Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1963. Т. 5. С. 10—14.
63. Илгунас В. И., Яронис Э. П.//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 145- 149.
64.Abowitz G., Gordon R. B.//J. Cmeh. Phys. 1962. Vol. 37. P. 125—129.
65. Barmatz M., Rudnick I.//Phys. Rew. 1968. Vol, 170. P. 224—228.
66. Трелин Ю. е., Васильев И. В.//Применение ультраакустики к исследованию вещества. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 13. С. 3—10.
67. Gordon R. B.//Acta Met. 1959. Vol. 7. P. 1—8.
68. Полоцкий И. Г., Ходов З. Л.//Вопросы физики металлов. 1955. Т. 6. С. 70-74.
69. Полоцкий И. Г., Ходов З. Л.//.А.куст. журн. 1958. Т. 4. С. 184—187.
70. Hubbard J. S., Loomis A. L.//Phyl. Mag. 1928. Vol. 5. P. 1177—1184.
71. Kleppa O. Y. J. Chem. Phys. 1949. Vol. 17. P. 668—672.
72 Jarzinski J.//Proc. Phys. Soc. 1963. Vol. 81. P. 745—749.
73. Пронин Л. А., Филиппов С. И.//Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1963 Т. 11. С. 11—17; Казаков Н. Б., Пронин Л. Д., Филиппов С. И.//Там же. 1964. Т. 12. С. 11—16.
74 Plass K. G.//Acoustica. 1963. Vol. 13. P. 240—244; Akust. Beih. 1963. Bd 13. S. 240—246.
75. Hunter J. L., Hovan K. S.//J. Chem.Phys. 1964. Vol. 41. P. 4013—4016, J. Acoust. Soc. Amer. 1964. Vol. 36. P. 1040—1043; Hunter J. L., Welch T. J., Montrose C. J.//J, Acoust. Soc. Amer. 1963. Vol. 35. P. 1568—1572.
76. Отпущенников Н. Ф., Сысоев И. В.//Доклады I Всесоюзного симпозиума по акустооптической спектроскопии. Ташкент: ФАН, 1976. С. 109—113.
77. Wilson W., Bradlay D.//J. Acoust. Soc. Amer. 1964. Vol. 36. P. 333—338.
78. Hawley S., Allegra J., Holton Y.//J. Acoust. Soc. Amer. 1970. Vol, 47. P. 258—264.
79. Авгибаев Б., Икрамов Ш. Х., Шин И. Б.//Доклады I Всесоюзного симпозиума по акустооптической спектроскопии. Ташкент: ФАН. 1976. С. 148—151.
80. Smith A. H., Lawson A. W.//J. Chem. Phys. 1954. Vol. 22. P. 351—356.
81. Hunter J. L., Dardy H. D., Bucaro J. A.//Preprint ND26. Congress Intern. Acoust. Liege. 1965. P. 165—167.
82. Pyro J. F., Edmonds P. D.//**Mol.** Cryst. Lig. Cryst. 1974. Vol. 25. P. 175—177.
83. Wetsel G. C., Speer R. S., Lowry B. A. e. a.//J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 1495—1498.
84. Miyano K., Ketterson J. B. Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 34. P. 1047—1052.
85. Miyano K., Ketterson J. B.//Phys. Rev. 1975. Vol. A12. P. 615—619.
86. Walsh J. M., Rice M. H.//J. Cmeh. Phys. 1957. Vol. 26. P. 815 819.
87. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. М.: Физматгиз. 1966; Гунь-Сюфань, Зарембо Л. К., Красильников В. А.//Акуст. журн. 1963. Т. 9. С. 382.

88. Beyer R. T., Coppens A. B.//Proc. 5th Intern. Comm. Acoust. Congr. Liege. 1965. P. 515—516.
89. Swamy K. M., Narayan K. L., Swamy P. S.//Acoustica. 1975. Vol. 32. P. 339—342.
90. Шкловская-Корди В. В.//Акуст. журн. 1963. Т. 9. С. 107-110.
91. Михайлов И. Г. Шутилов В. А.//Там же 1960. Т. 6. С.340 343.
92. Emery J.. Kammoun C.//C. R. Acad. Sd. (Paris). 1976. Vol. 283. P. 131—134.
93. Adier L., Hiedemann E. A.//J. Acoust. Soc. Amer. 1962. Vol. 34. P. 410 415.
94. Зверев В. А., Калачев А. **И**.//Акуст. журн. 1958. Т. 4. С. 321-325
95. Swamy K. ***Г/Л.,*** Narayan K. L., Swamy p; S.//Acoustica. 1976. Vol. 34. P. 48—51.
96. Thakur K. P.//Ibid. 1976. Vol. 39. P. 270—272.
97. Hagelberg M. P., Helton G., Kao S.//J. Acoust. Soc. Amer. 1967. Vol. 41. P. 564—568.
98. Markham J., Beyer R., Lindsay R. B.//Rev. Mod. Phys. 1951. Vol. 23. P. 353—359.
99. Thorp W. H.//J. Acoust. Soc. Amer. 1967. Vol. 42 P. 272—275.
100. Lacani A., Nairy J.//J. Phys. Kad. 1953. Vol. 14 P. 272-275.
101. Heaseall L., Lamb J.//Proc. Phys. Soc. 1956. Vol. 69. P. 869—873.
102. Mallikarjuna Rao S. P., Suryanarayana M.//Ind. J. Pure and Appl. Phys. 1973. Vol. 11. P. 824—829.
103. Pellam J. R., Gait J. K.//J. Chem Phys. 1946. Vol. 14. P. 608—613.
104. Бердыев А. А.//Изв. АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн. 1965. № 3. С. 16—21: Бердыев А. А., Лежнев Н. Б.// Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 247—250.
105. Парпиев К., Хабибулаев П. К., Халиулин М. Г.// Там же 1969. Т. 15. С. 466—468.
106. Hunter J. L.//J. Acoust. Soc. Amer. 1941. Vol. 13. P. 36—41.
107. Sette D.//J. Chem. Phys. 1951. Vol. 19. P. 1337—1341.
108. Бажулин П. А.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1938. Т. 8. С. 457—460.
109. Lamb J., Pinkerton M. M.//Proc. Roy. Soc. 1949. Vol. 199. P. 114—120.
110. Nomoto O., Kishimoto T., Ikeda T.//ВиП. Kobayaci Inst. Phys. Res. 1952. Vol. 2. P. 72—78.
111. Pinkerton M. M.**//РГОС.** Phys. Soc. 1949. VoL 62. P. 129—133.
112. Lawley L. E., Reed R. D.//Acoustica. 1955. Vol. 5. P. 316—320.
113. Matthias B. T.//Nature. 1948. Vol. 161. P. 325.
114. Pancholy M., Parthasarathy S., Chapgar A. F.// Nuovo Cimento. 1958. Vol 10. P. 111—116.
115. Andreae J. H., Lamb J.//Proc. Phys. Soc. 1951. Vol. B64. P. 1021—1026; Rapuano R. A.//Phys. Rev. 1947. Vol. (2)72. P. 78—83.
116. Давидович Л. А., Иванов А. А., Махкамов С. И. и др.//Акуст. журн. 1973. Т. 19. С. 26—31.
117. Шорошев Ю. Г., Лаишина Л. В., Шахпоронов М. И.**//ДОКЛ.** АН СССР. 1967. Т. 173. С. 70—72.
118. Махкамов С. И., Хабибулаев П. К., Халиулин М. Г.//Акуст. журн. 1974. Т. 20. С. 643—644.
119. Chase C. E.//Proc. Roy. Soc. 1953. Vol. A220. P. 116 121; Phys. Fluids. 1958. Vol. 1. P. 193—197.
120. Fox F. E., Rock G. D.//Phys. Rev. 1946. Vol. 2. P. 68—73; Smith M. C., Beyer R. T.//1948. Vol. 27. P. 654—658; Pinkerton J. M. M.//Nature. 1947. Vol. 1960. P. 128.
121. Кошкин Н. И.//Применение ультраакустики к исследованию вещества. М.: Изд. МОПИ. 1955. Вып. 1. С. 101—146.
122. Fox F. E., Wallace W.//J. Acoust. Soc. Amer. 1954. Vol. 26. P. 994—1001.
123. Towle D. M., Lindsay R. B.//J. Acoust. Soc. Amer, 1955. Vol. 27. P. 530—534.
124. Зарембо Л. К-, Красильников В. А., Шкловская-Корди В. В.**//ДОКЛ.** АН СССР. 1956. Т. 109. С. 731-734
125. Зарембо Л. К. Дне. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ. 1958.
126. Narasimhan V., Beyer R. T.//J. Acoust. Soc. Amer. 1956. Vol. 28. P. 1233—1234.
127. Наугольных К. А., Романенко Е. В.//Акуст. журн. 1958. Т. 4. С. 200—204.
128. Birch E.//EartTi Today/Ed. T. P. Gaskell, A. H. Cook. N.-Y. 1961. P. 295.
129. Salalanu C.//C. R. Acad. Sci. 1961. Vol. 252. S. 3021—3025.
130. Overton W. C.//J. Chem. Phys. 1950. Vol. 18. P. 113—118.
131. Winder D. R., Smith C. S.//Phys. Chem. Solids. 1958. Vol. 4. P. 128—133.
132. Беранек Л. Акустические измерения: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1952.
133. Белянин В. А., Новиков И. И., Проскурин В. Б.// Тр. IX Всесоюзной акустической конференции. Вып. 2. С. 107-110.
134. Отпущенников Н. Ф.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1952. Т. 22. С. 782—786; Кузьмеико В. А.//Применение ультразвуковых колебаний для исследования свойств, контроля качества и обработки металлов и сплавов. Киев: Изд-во АН УССР. 1960. С. 79—85.
135. МОРОЗОВА. И., Проклов В. В., Станковский Б. А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. М.: Радио и связь. 1981.
136. Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М.: Физматгиз. 1960.
137 Иванов В. Б. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛЭТИ, 1971.
138. Auberger M., Reinehart J. S.//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 219—221.
139. Bacher K.//Verh. Deutsch. Phys. Ges. 1939. Bd. 3. S. 68—72; Z. Erdol und Kohle. 1949. Bd 2. S 125—127; Воларович М. П., Баюк Е. И.//Применение ультраакустики к исследованию вещества. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 11.
140. Мартынов Е. Г., Матвеев А. К.//Там же. 1960. Вып. 10. С. 147—152.
141. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела: Пер. с аш-л./Под ред. И. Г. Михайлова, В. В. Леманова. М.: Мир. 1972. С. 307.
142. Дричко И. Л., Илисовский Ю. В., Гальперин Ю. М.//Физика твердого тела. 1969. Т 11. С. 2463—2466.
143. McSkimin H. J., Andreatch P. Jr.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 3312—3315.
144. Меркулов Л. Г.//Акуст. журн. 1959. Т. 5. С. 432—437.
145. Papadakis E. P.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 2168—2172.
146. Chatak S. K-, Sinha S. K.//Indian J. Phys. 1974. Vol. 48. P. 66—74.
147. Meitzler A. H.//Ultrasomc Transducer Materials/ Ed. O. E. Mattiat. N.—Y.: Plenum Press. 1971.
148. Kor K. S., Tandon U. S., Mishra P. K.//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 2396—2399.
149. Vallin J., Marklund K., Sikstrom J. 0.//Arkiv for Pysik. 1966. Bd 33. S. 345—351.
150. Dixon R. W.//J. Appl. • Phys. 1967. Vol 38. P. 3634—3639.
151. Ушида Н. С. Ниидзеки Л. Н.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1973. Т. 61. С. 21—32.

152. Lee B. H.//J. AppJ. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2984^ 2988.
153. Леманов В. В., Авдонин В. Я., Павленко А. В.// Физика твердого тела. 1969. Т. 11. С. 2635—2639.
154. Beattic A. G., Samara G. A.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 2376—2378.
155. Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона, Р. Терстона: Пер. с англ./Под ред. И. Л. Фабелинского. М.: Мир. 1973. Т. 6.
156. Байрамов Б. Х., Захарченя Б. П., Писарев Р. В. и. др.//Физика твердого тела 1971. Т. 13. С. 3366—3370.
157. Melngailis J., Vetelino J. F., Jhunjhunwala A. e.a.// Appl. Phys. Lett. 1978. Vol. 32. P. 203—207.
158. Север Г. А., Баранский К. Н.//Изв. АН СССР. Сер.физ., 1971. Т. 35. С. 935—939.
159. Аиисимкин В. И., Земляницын М. А., Морозов А. И.//Физика твердого тела. 1975. Т. 17. С. 1513—1517.
160. Красильников О. М., Векилов Ю. Х., Кадышевич А. Е.//Там же. 1969. Т. 11. С. 1200—1207.
161. Alton W. J,. Barlow A. J.//J. AppL Phys. 1967. Vol. 38. P. 3023-3027.
162. Spencer E. G., Denton R. T.//Ibid. 1963. Vol. 34. P. 3059-3064; Belt R. F.//Laser Focus. 1970. Vol. 6. P. 44-46.
163. Bateman T. B.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2194-2201.
164. Clark A. E., Strakna R. E.//J. Appl. Phys. 1961, Ы. 32. P. 1172—1177.
165. Landolt-Bornstein. Zahlenw erte und Funktinen aus Natun¥issenschaften und Technik. Neue Serie, Bd 7. **KrisfallstrLiterdaten** anorgatiischer Verbindungen. Berlin. Springer Verlag. 1971.
166. Беляев Л. М., Витовский Б. В., Добржанский г. Ф.//**РОСТ** кристаллов. М.: Изд-во АН СССР. 1957 Т. 1. С. 249-257; Тырбу И. А., Ульянов В. Л. Ботаки А. А.//Физика твердого тела. 1973. Т. 15. С. 3389—3394.
167. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука. 1965.
168. Pratt R. G., Simpson G., Grossley W. A.//Electron. Lett. 1972. Vol. 8. P. 127.
169. Gottlieb M., Isaaks T. J., Feichtner J. D. e. a.// J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 5145—5150; Isaaks T. J., Coltlieb M., Daniel M. e. a.//J. Electr. Mat. 1975. Vol. 4. P. 67-73.
170. Yano T., Nabeta J., Wat^inabe A.//AppL Phys. Left. 1971. Vol. 18. P. 570- 571.
171. Warner A. W., Pinkow D. A.//J. Acoust. Soc. Am. 1970. Vol. 47 P. 791 -797.
172. Bateman T. B.//Ibid. 1962. VoL 33. P. 3309—3317.
173. Cline C F., Dunegan H. L., Henderson G. W.// Ibid. 1967. Vol. 38. P. 1944-1952.
174. McFee J. H.//Ibid. 1963. VoL 34. P. 1548—1557; Hutson A. R.//Phys. Rev. Lett. 1960. VoL 4. P. 505—507.
175. Федотов И. И., Кузнецов В. Н.//Применение ультргакустики к исследованию веществ. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 14. С. 269—275.
176. Александров К. С., Анистратов А. Т., Рез И. С. I др.//Физика твердого тела. 1977. Т. 19. С. 1863—1868.
177. Сильвестрова И. Ш., Барта Ч., Добржанский Г. Ф. и др.//Кристаллография. 1975. Т. 20. С. 1062—1068.
178. Pinnow D. A., Van Uitert L. G., Warner A. W. e.a.//Appl. Phys. Lett 1969. Vol. 15. P. 83—85.
179. Бадиков В. В., Богданов С В., Годовиков А. А. и др.//Акуст. журн 1971 Г. 17. С. 300—305.
180. Можайский В. Н.//Приборы и техн. эксперим. 1974 Т. 2. С. 200—206.
181. Dieulesaint E., Royer D. Ondes elastiques dans les solids. Application au traitement du signal/Ed. Masson, Paris. 1974.
182. Coquin G. A., Pinnow D. A., Warmer A. W.//J. AppL Phys 1971. VoL 42. P. 2163—2168.
183. Lange J. N.//Phys. Rev. 1968. VoL 176. P. 1030—1035.
184. Kleszczewski Z.//Archiwum Akustiyki. 1978. Vol 13. P. 235—241.
185. Ohmachi C, Uchida N.//J. AppL Phys. 1970. Vol 41. P. 2307—2313. I
186. Dutoit M.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics 1973. VOL SU-20. P. 279—288.
187. СосоВ Ю. М., Юшин Н. К., Кудзин А. Ю.//Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 475—477.
188. Писаревский Ю. В., Пополитов В. И., Сильвестрова И. М. и др.//Материалы XII Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов. 1983. Ч. II. С. 363-364.
189. Бондаренко В. С., Гавриляченко В. Г., Чкалова В. В. и др.//Науч. тр. вузов ЛитССР. Ультразвук. 1977. Т. 9. С 105-111.
190. Ohmachi C.. Uchida N.//J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 3583-3589.
191. Луданов А. Г., Фотченков А. А., Яковлев Л. А.// Акуст. жури. 1976. Т. 22. С. 612—617.
192. Зобини О. П., Яковлев Л. А.//Там же. 1976. Т. 22. С. 234—239.
193. Weidner D.//Geophys. Rev. Lett. 1975. Vol. 2. P. 189—191.
194. Заграй Н. П., Максимов В. Н.//Прикладная акустика, Таганрог: Изд. ТРТИ. 1975. Вып. 1. С. 187-192.
195. Аникеев Д. И.. Зарембо Л. К., Карпачев С. Н.// Физика твердого тела.. 1982. Т. 24. С. 2938—2941.
196. Левитес А. Ф., Минаева К. А., Струков Б. А. и др.//Приборы и техн. эксперим. 1974. № 5. С. 187—194.
197. Sapriel J.//Appl. Phys. Lett. 1971. VoL 19. P. 533-535.
198. Spenser E. G., Lenzo P. V.//J. Appl Phys. 1967. Vol. 38. P. 423—428.
199. Smith R. T., Welsh F. S.//J Appl. Phys. 1971. VoL 42. J. 6—15.
200. Чкалова В. В., Бондаренко В. С., Клюев В. П. и др.//Электронная техника. Сер. 14. 1968. Вып. 4. С. 158—164.
201. Клудзин В. В.// Физика твердого тела. 1971. Т. 13. С. 651—656.
202. Лежнев И. Б„ Карабаш В. И.//Материа.пы XI Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Душанбе. 1981. Ч. П. С. 79—80.
203. Баранский К. Н., Бердыев А. А., Писаревский Ю. В. и **ДР.//ИЗВ.** АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн. 1975. № 1. С. 37—44.
204. Carleton H. R., Soref R. A.//App1. Phys. Lett. 1966. VOL 9. P. 109—112.
205. Ultrasonic Transduser i\1aterials/Ed. O.E. Mattiat. N. Y.: Plenum Press. 1971.
206 Родриг Г. П.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрои. 1965. Т. 53. С 1613—1.623.
207. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н.//А4етоды модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
208. Дьяков А. М., Илисавский Ю. В., Фарбштейн И. И. и др.//Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 564—566.
209. Bajak I. L.//2 pracovha konferencia cs. fyzikow, Bratislava. 1971. S. 184—185.
210. Warner A. W., Coquin G. A., Fink J. L.//AppL Phys. 1969. VOL 40. P. 4353—4358.
211. Моисеева Н. А., Сильвестрова И. М., Писаревский Ю. Б. Акустические свойства кристаллов. Бифталат калия. Препринт ИКАН. М. 1977.
212. Беликова Г. С., Беляев Л. М., Головей М. И. и др.//Кристаллография. 1974. Т. 19. С. 566—573: Беликова Г. е., Писаревский Ю. В., Сильвестрова И. М.//Физ. и хим. **ТВ.** тела. 1973. Т. 3. С. 18—24,

213. Tokuro I., Itsuro I.//Japan J. Appl. Phys. 1976. Vol. 15. P. 1451—1457.
214. Gottlieb M.//Laser Focus. 1972. Vol. 8. P. 24—28.
215. Duderov N. G., Demianets L. N., Lobachev A. M. e. a.//J. Crystal] Growth. 1978. Vol. 44. P. 483—489.
216. Andrews R. A.//IEEE J. Quant. Electron. 1970 Vol. QE. P. 68—77.
217. Epstein D. J., Herrick W. H., Turek R. F.//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 1491—1497.
218. Busch M., Toledand **I.** C., Torres J.//Opt. Commun. 1974. Vol. 10. P. 243—249.
219. Hochli U. T.//Phys. Rev. 1972. Vol. B6. P. 1814—**1821.**
220. Roland G. W.//Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 21. P. 52-54.
221. Кунигелис В. Ф., Самулионис В. И.//Науч. тр. вузов ЛитССР. Ультразвук. 1972. Т. 14. С. 11—16.
222. Уайт Д. Л.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1970. Т. 58. С. 68—75.
223. Яковкин И. Б., Петров Д. В. Дифракция света на акустических поверхностных волнах. Новосибирск: Наука. 1979.
224. Pennury O., Lakin K. M. Proc. Ultrasonic Simp. Los. Angel. 1975. P. 478—479.
225. Сибаяма К., Яманури К., Сато Х. и др.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 27-29.
226. Левин М. Д., Лобанова Г. А., Пащин Н. С. и др.//Акуст. журн. 1975. Т. 21. С. 68—71.
227. Campbell J. J.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2797—2802; Nutson A. R., White D. L.'//Ibid. 1962. Vol. 33. P. 40—49; Szabo E. L., Slobodnik A. J.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1973. Vol. SU-20. P. 240 252.
228. Microwave Acoustics Handbook/Ed. A. Slobodnik, E. D. Conway, N. Y.: Office of Aerospace Research United State Air Force. 1970. Vol. 1.
229. O'Connell R. M., Carr P. H.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1977. Vol. SU-24. P. 376—389.
230. Scott B. A., Ingebrigsten K. A., Tseng C. C.//Nat. Res. Bull. 1970. Vol. 5. P. 1045—1051
231. Жаффе Н., Берлинкур Д. А.//Тр Ин-та инж, электротехн. и радиоэлектрон. 1965. Т. 53. С. 1552—1567; Namatsu S., Doi K., Takahasti M.//Japan J. Appl. Phys. 1972. Vol. 11. P. 816—821; Gupta S. N.. Vatelino **J.** F., Lipson V. B. e. a.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 858—863.
232. Слободиик А. Д.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 10—26.
233. Каринский С. С. Устройства обработки сигналов на ультразвуковых поверхностных волнах. М.: Сов. радио. 1975.
234. Яковкин И. Б., П&щин Н. С./Дезисы докладов VIII Всесоюзн. конф. по квантовой акустике и акустоэлектронике. Казань. 1974. С. 38—39.
235. Ingebrigsten K. A., Tonning A.//App1. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 16—18.
236. Колдрен Л. А., Шоу Х. Дж.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 30—44.
237. Coquin G. A., Tiersten H. F.//J. Acoust. Soc. Amer. 1967. Vol. 41. P. 921—939.
238- Залесский В. В., Мельцер Я. Е., Стремовский Э. В.//Приборы и техн. эксперим. 1976, № 6. С. 107 112.
239. Kraut E. A., Tittman B. R., Graham L. J e. ЛЦ Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 17. P. 271—278; Melngailis J., Vetelino J. F., Jhunjhunwala A. e. a.Ibid. 1978. Vol. 32. P. 203—205.
240. Slobodnik A. J., Conway E. D.//Electron. Lett. 1970. Vol. 6. P. 171—173; Slobodnic A. J., Szabo T. L.// Electron. Lett- 1971. Vol. 7. P. 257—259.
241. Фарнел Дж.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона. М.: Мир. 1973. Т. 6. С. 139—158.
242. Simpson G.//ElectrGn. Lett. 1973. Vol. 9. P. 21^ 24.
243. Bateman T. B., McSkimin H. J., Whelar K.//J Appl. Phys. 1959. Vol. 30. P. 544—551; Hutson A. R.// Phys. Rev. Lett. 1960. Vol. 4. P. 505—507; Кайно Г. С.// Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 188-199.
244. Isaaks T. J., Weinert R. W.//J. Electron. Mat. 1976. Vol. 5. P. 13—18.
245. IVVolokhia N. H., Issa M. A.//Pramana. 1978. VoL 11. P. 289—295.
246. Dieulesaint E., Royer D.//Piezoelectricite. 1976. VoL 54, P. 180—185.
247. Schulz M. B., Holland M. G.//Component performance and systems applications of SAW device. Scotland. 1973. P. 1—I0.
248. Rouvaen J. M., Bridox E., Waxin G. e. a.//J. Appl, Phys. 1978. Vol. 49(4). P. 2306—2312.
249. Seavy M. H.//Solid State Comm. 1972. Vol. 10. P. 219—223.
250. Бережнов В. В., Преображенский В. Л., Экономов И. А. и др.//Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. С. 376—379.
251. Campbell J. J., Jones W. R.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1968. Vol. SU—15. P. 209—220.
252. Кнопов Л.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. И. Л. Фабелинского. М.: Мир. 1968. Т. 3. Ч. Б.
253. Birch F., Bancroft D,//Bull. Seismol. Soc. Amer. 1938. Vol. 28. P. 243—250.
254. Bruckshaw J., Mahanta P.//Petroleum (Lond.). 1954. Vol. 17. P. 14—19.
255. Knopoff L., Porter L. D.//J, Geophys. Res. 1963. Vol. 68. P. 6317—6325.
256. Peselnick L., Zietz **I.**//Geophys. 1959. Vol. 24. P. 285-291.
257. Born W. T.//Ibid. 1941. Vol. 6. P. 132—139.
258. Mason W. P., McSkimin H. H.//J. Acoust. Soc. Amer. 1947. Vol. 19. P. 466—475.
259. Zemanek J. Jr.. Rudnick L//Ibid. 1961. Vol. 33. P. 1283—1288,
260. Lucke K.//J. Appl. Phys. 1956. Vol. 27. P. 1433—1438.
261. Auberger M., Rinehart J. S.//Ibid. 1961. Vol. 32. P. 219—225.
262. Roth W.//Ibid. 1948. Vol. 19. P. 901—908.
263. Lindsay G.//Phys. Rev. 1914. Vol. 3. P. 397—405.
264. Wedel R. L., Walther H.//Phys. 1935. Vol. 6. P. 141-148.
265. Gemant A., Jackson W.//Phyl. Mag. 1937. Vol.23. P. 960—971.
266. Kimball A. L., Lovell D. E.//Phys. Rev. 1927. VoL 30. P. 948—956.
267. Papadakis E. P.//J. Acoust. Soc. Amer. 1965. Vol. 37. P. 711—718.
268. West F. G.//J. Appl. Phys. 1958, Vol. 29. P. 480—485.
269. Blair D. G., Buckingham M. **I.,** Edwards C. e. a.// Proc. 2nd Marcel Grossmann Conf- General Relativity, friest. 1980. P. 185—187.
270. McGuigan D. G., Lam C. C., Douglass D. H. e.a.//J. Low Temp. Phys. 1978. Vol. 30. P. 621—626.
271. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Панов В. И. Системы с малой диссипацией. М.: Наука. 1981.
272. Гранато А., Люкке К.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова и Л. Д. Розенберга. М.: Мир. 1969. Т. 4. Ч. А. С. 261—321.
273. Пападакис Э.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова и В. А. Шутилова. 1970 М: Мир. Т. 4. Ч. Б. С. 317—381.
274. Hel-me B. G., King P. J.//Phys. Stat. Solids. 1978. Vol. 45. P. K33—K39,

275. Hickernell F. S.//IEEE Trans. Microwave Theory I jnd Techn., 1969. Vol. MTT-17. P. 957—963.
276. Landolt-Bornstein.,Zalenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik. Neue Series. Bd 3. Ferro- und Antiferroelectrische Substanzen. Berlin. 1969.
277. Venturini E. L., Spencer E. G., Ballmann A. A.// J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 1622—1628.
278. Меркулов Л. Г., Коваленок Р. В., Коноводченко Е. В.//Физика твердого тела, 1969 Т. 11. С. 2769—2774; 1971. Т. 13. С. 1171—1176; 1972. Т. 14. С. 340—344.
279. Auld B. A. Acoustic Fields and Waves in Solids. N. Y.: John Wiley. 1973.
280. Holland M. G.//1EEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1968. Vol. SU-15. P. 18—31.
281. Губанов А. И., Давыдов С. Ю.//Физика твердого тела, 1972. Т. 14. С. 2187—2191.
282. Oliver D. W., Slack G. A.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 1542—1547
283. Rehwald W.//Ibid. 1973. Vol. 44. P. 3017—3021.
284. Шлеман Е., Джозеф Р. И., Кохейн Т.//Тр. Ин-та электротехн. и радиоэлектрон. 1965. Т. 53. С. 1685—1698.
285. Беляев Л. М., Багдасаров Х. С., Сильвестрова И. и др.//Изв. АН СССР. Сер. фш. 1971. Т. 35. С. 941-945.
286. Гришмановский А. П., Юшин Н. К., Богданов. В. Л. и др.//Физика твердого тела. 1971. Т. 13. С. 1833-1838.
287. Абрамович А. А., Хромова Н. Н., Шутилов В. А.// Акуст. журн. 1976. Т. 22. С. 278—283.
288. Wilkinson C. D., Caddes D. E.//J. Opt. Soc. Amer. 1966. Vol. 40. P. 498—504.
289. Broussand G. Optoelectronique/Ed. Masson. Paris. 1974.
290. Меркулов Л. Г., Яковлев Л. А.//Акуст, журн. 19Е9. Т. 5. С. 374—381.
291. King P. J.//J. Phys. 1970. Vol. 3. P. 500—506.
292. Мастихин В. М., Богданов С. В., Дарвойд Т. И. и др.//Оптико-механическая промышленность. 1977. № 8. С. 36-43.
293. Семенов В. И., Сапожников В. К., Авдиенко К. И. и др.//Физика твердого тела. 1976. Т. 18. С. 2805—2809.
294. Smith A. B., Kedzie R. W., McManon D. H. e. a.// J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 2687—2692.
295. Василевская А. С., Сонин А. С., Рез И. С. и др.// Изв. АН СССР. Сер. физ. 1967. Т. 31. С. 1159—1163.
296. Ohmachi J., Uchida N.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 521-527.
297. Мастихин В. *Г.Л.,* Сапожников В. К., Сербуленко М. Г. и др.//Автометрия, 1975. Т. 3. С. 31—38.
298. Lewis I. T., Lehoczky A., Briscoe C. V.//Phys. Rev. 1967. Vol. 161. P. 877—883.
299. Hemphill R.//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 35-37.
300. Holovey M. I.. Gurzan M. J., Olexeyk J. D. e. a.// Kristall und Techn. 1973. Bd 8. S. 453—457.
301. Есаян С. Х., Леманов В. В., Рез И. С. и др.// Физика твердого тела. 1973. Т. 15. С. 907—912.
302. Богданов С. В, Зубринов И. И., Шелопут Д. В.// Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. С. 2013—2017.
303. Dutoit H.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics^ 1973. Vol. SU-20. P. 279—291.
304. Midford T. A., Wanuga S.//J. Appl. Phys. 1965, Vol. 36. P. 3362—3368.
305. Fitzgerald T. M., Chick B. B.. True! R.//Ibid 1964. Vol. 35. P. 2647—2653
306. Григорьев М. А., Зюрюкин Ю. А., Наянов В. И. и др.//Физика твердого тела. 1970. Т. 12. С. 3033—3038,
307. Григорьев *Г.Л.* А., Зайцев Б. Д., Пылаева Г. И. и др.//Там же, 1973. Т. 15. С. 1398—1402.
308. Мэзон У. Физическая акустика: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова, Л. Д. Розенберга. М.: Мир. 1969.
309. Fitzgerald T. M., Silverman B. D.//Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 25A. P. 245-246.
^ ^ 3^10. Reinjes J.^^Jchulz M. B.//J. Appl. Phys. 1968.
311. Smakula A. Einkristalle, Wachtsum, Herstellung und Anwendung. Berlin. 1962.
312. Леманов В. В. Дис. ... д-ра физ-мат. наук. Л.: ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе. 1973.
Р 482^'48^''' •'•""Phys. Rev. 1968. Vol. 167.
314. Barret H. H.//Ibid. 1969. Vol. 178. P. 743—748
315. Levy S., Truell R.//Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25 P. 140 152.
316 Гончаров К. В., Клюев В. П., Лямов В. Е. и др.// Тр. VI Всесоюзн. акустич. конф. М. 1968.
317. Авдонин В. Я., Леманов В. В., Смирнов И. А. и др.//Физика твердого тела. 1972. Т. 14. С. 877—883.
318. Беликов Ю. Х., Кадышевич А. Е.. Красильников О. Е.//Там же. 1971. Т. 13. С. 1310—1320.
319. Dransfeld K.//J.Phys. Colliq, CI, Suppl. 2. 1967. Vol. 28. P. 157-162.
320. Де-Клерк Дж.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова, Л^Д. Розенберга. М.: Мир. 1969. Т. 4. Ч. А. С. 231^
321. Григорьев М. А., Зюрюкин Ю. А., Наянов В. И. и др.//Электронная техника. Сер. Контрольно-из,мерительная аппаратура. 1970. Вып. 1(19). С. 121—126.
322. Иванов С. Н., Котелянский И. М., Медведев В. В. и Др.//Журн. эксперим. и теорет физ. 1976. Т. 70.
323. Bommel H.//Phys. Rev. 1955 Vol. 100. P. 758—766.
324. Самулионис В. И., Куниге.лис В. Ф., Гарчика Э. П.//Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 459—461.
325. Майщик Е. П., Струков Б. А., Синяков Е. В. и др.//Физика твердого тела. 1977. Т. 19. С. 335—340.
326. Богданов С. В., Балакирев М. К., Иванов Е. В. и др.//Материалы XII Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов. 1983. Ч. I. С. 15—
327. Абрамович А. Л., Шутилов В. А., Левицкая Т. Д. и др.//Физика твердого тела. 1972. Т. 14. С. 2585—2590
328. Илисавский Ю. В, Стернин В. М.//Материалы XII Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов, 1983. Ч. II. С. 281—282.
329. Антонов С. Н., Проклов В В., Миргородский В. И. и др. Материалы XI Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Душанбе. 1981. Ч. I. С. 174 -175
330. Keller 0.//Phys. Lett. 1972. Vol. 39A. P. 235—236; Siebert F., Keller O., Wettling W.//Phys. Stat. Sol. 1971. Vol. 4. P. 67—71.
331. Farnell G. M.//Wave Electronics. 1976. Vol. 2. P. 1—24.
332. Carr P. H.//IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1969. Vol. MTT-17, N 11. P. 458—471.
333. Salzmann E., Pleninger T., Dransfeld K.//Appl. Phys. Lett. 1968. Vol. 13. P. 14—17.
334. Акустические кристаллы: Справочник/Под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука. 1982.

ГЛАВА 8

ТЕРМОМЕТРИЯ

А. В. Инюшкин

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Температура — фундаментальная физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Измерение температуры предполагает построение шкалы температур на основе воспроизведения ряда равновесных состояний — основных реперных (постоянных) точек, которым приписаны определенные значения температур, и создания интерполяционных приборов, реализующих шкалу между ними.

11-я Генеральная конференция по мерам и весам (1960 г.) приняла в качестве основной «Международную термодинамическую температурную шкалу (Кельвина)». Термин «основная шкала» означает, согласно положению конференции, что должна «существовать возможность в конечном счете отнести к этой шкале результат любого измерения температуры». Термодинамическая шкала температур определяется соотношением, которое выводят из рассмотрения обратимого цикла Карно,

где Qi — количество теплоты, которое машина Карно получила при температуре 7'i в обратимом изотермическом процессе; Q2 — количество теплоты, которое машина отдала при температуре Гг во втором изотермическом процессе. Термодинамическая шкала не зависит от природы рабочего тела.

Термодинамическую температуру обозначают символом *Т*. Ее единица*' — кельвин (символ К) определена как 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды [1].

Термодинамическую температуру выражают также через температуру Цельсия (символ *t),* которая определена соотношением

$$< = 7 — 273{,}15 \text{ K}.$$

Единица температуры Цельсия — градус Цельсия (символ "С). Градус Цельсия равен кельвину.

Прямое использование цикла Карно для измерения температуры обычно приводит к большим экспериментальным погрешностям. Поэтому разработаны практические методы воспроизведения термодинамической температуры, в которых связь между измеряемой величиной и температурой выводят иа основе законов термодинамики или статистической физики. К числу таких соотношений относятся уравнение состояния газа, закон Кюри для парамагнетиков, зависимость скорости звука в газе от температуры, зависимость напряжения тепловых шумов на электрическом сопротивлении от температуры, закон Стефана — Больцмана. Температурные шкалы, установленные с использованием указанных соотношений, зависят от свойств термометрического тела, что приводит к появлению таких характеристик шкалы, как воспроизводимость и точность. Кроме того, некоторые шкалы основаны на приближенно выполня-ющихся закономерностях; возникает понятие инструментальной температуры (магнитной, цветовой и т. п.), отличной от термодинамической.

*' Современное определение едини1(ы термодинамической температуры было принято 10-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1954 г.). До 1967 г. единица имела название «градус Кельвина».

Экспериментальные трудности, возникающие при воспроизведении термодинамической шкалы, обходят введением практических температурных шкал*^. Практические шкалы устанавливают так, чтобы температуры, измеренные по ним, совпадали с термодинамическими в пределах точности соответствующих первичных приборов.

Первая практическая температурная шкала была принята 7-й Генеральной конференцией по мерам и весам и получила иазвание Международной температурной шкалы 1927 г. (МТШ —27). Переработанная редакция этой шкалы — МТШ — 48 — была принята 9-й Генеральной конференцией по мерам и весам в 1948 г., а исправленная ее редакция — Международная практическая температурная шкала 1948 года (МПТШ — 48) — 11-й Генеральной конференцией (1960 г.) В настоящее время узаконена шкала 1968 года — МПТШ — 68 (исправленная редакция 1975 г.). В 1976 г. Консультативный комитет по термометрии при Международном бюро мер и весов рекомендовал для использования в области низких температур *предварительную температурную шкалу* (ПТШ — 76). Планируется, что в 1987 г. Генеральная конференция примет новую международную практическую температурную шкалу, которая будет определенным объединением переработанных и уточненных шкал МПТШ — 68 и ПТШ — 76.

Общие вопросы термометрии в том или ином аспекте рассмотрены в [2—11]. Большое количество информации по всем разделам термометрии имеется в трудах серии международных конференций по термометрии [12].

8.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Помимо шкал Кельвина и Цельсия в некоторых странах используют шкалы Ренкина, Фаренгейта и Реомюра. Между единицами температуры по этим шкалам и

градус Ренкина (°Ra) =

градус Фаренгейта (°F) = $\frac{5}{}$ — К 5

Пересчет значений температуры между шкалами осуществляют по формулам

« Ra) = -1- « (К) = f4 «-273,15) (°С);

— («—32)+ 273,15 (К) =

п+ 273,15)(К) = 4 «(°С) ;

Термин «практическая шкала» вводят для того, чтобы отличать значения температуры, определенные по данной шкале, от соответствующих значений по термодинамической шкале температур.

«(К) = ГР);

«ГС) = (- ^ « + 3 2 1 r F) ;

„(К) = —(« - 2 7 3 . 1 5) Г Ю ; я Г С) = — « Г Ю .
5 о

Международная практическая температурная шкала 1968 года (МПТШ — 68) принята на сессии Международного бюро мер и весов (1968 г.) в соответствии с решением 13-й Генеральной конференции по мерам и весам. Исправленная редакция шкалы принята 15-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1975 г.).

Данная шкала установлена для температур выше 13,81 К. В МПТШ — 68 используются международные практические температуры Кельвина ***(Tes)*** и Цельсия (t6s)-t68^Tes—27S,l5 К. Единицы международной практической температуры — **Кельвин** (К) и градус Цельсия (-С): 1 К=1 "С.

Основные реперные точки МПТШ—68 и приписанные им значения Т^ приведены в табл. 8.1.

В качестве интерполяционного прибора для области температур от 13,81 К до 630,74 "С применяют платиновый термометр сопротивления *'. Его относительное сопротивление определяют по формуле

$$WiTes)=R(T^)/R\ (273,15K),$$

где/г — сопротивление термометра. Значение №(7'бб) должно быть не меньше 1,39250 при Гее=373,15 К.

Для области от 13,81 до 273,15 К температуру Tes определяют по формуле

$$W\ (Tee) = r^i^T\text{-}es\ (.Tes) + ^t\ (T^), \qquad (8.1)$$

где 11>'ккт-б8(Гее)—относительное сопротивлен-ие, соответствующее стандартной функции (табл. 8.2.). Поправки h.W,{Teii) при температурах основных реперных точек получают из измеренных значений W(7"6s) и соответствующих значений и7ккт-бв(7"бв) (табл. 8.3.). При промежуточных температурах -М^ДГее) определяют по интерполяционным формулам

$$13,81\ К\ -\ 20,28\ К: ДН7i\ \textbf{\textit{(TJ}} = Л^ + \ +\ +CrT1s+\ 0,T|з. \qquad (8.2)$$

Константы Ai, Si, Ci и Di определяют из значений измеренных в тройной точке равновесного водорода, при температуре 17,042 К и точке кипения равновесного водорода, а также из значения ***d***(AW)/*dT*^ в точке кипения равновесного водорода, вычисленной по уравнению (8.3):

$$20,28К\ -\ 54\ ,361\ К: \ AW^\ [Г^в) = A^ + B^T^ \text{-}f \ +\ ; \qquad (8.3)$$

Константы Ar, Sj, Cr и D^ определяют из значений измеренных в точке кипения равновесного водорода, точке кипения неона и тройной точке кислорода, а также из значения d(AW)ldTes в тройной точке кислорода, вычисленной из уравнения (8.4):

Практически два платиновых термометра R (273,15 К), равным 100 и 10 Ом.

$$54,361\ К\ -\ 90,188\ К: \ Шг\ (Т^) = Лз + S3\ Г^ + \ +\ CsTis\ . \qquad (8.4)$$

Константы Аз, Вз и Сз определяют из значений AW(Tes), измеренных в тройной точке и точке кипения кислорода (или тройной точке аргона), а также из значения й(Ди7)^Г68 в точке кипения кислорода (тройной точке аргона), вычисленной по уравнению (8.5),

$$90,188\ К\ -\ 273,15\ К: \ ДП^^\ (Г^) = Ь,\ (Г,,\ -\ 273,15\ К) + \ +\ «4\ (Г68\ —\ 273,15\ КГ\ (Tes\ —\ 373.15\ К) \qquad (8.5)$$

Константы Ы и е^ определяют из значений измеренных в точке кипения кислорода (или тройной точке аргона) и точке кипения воды.

Для области от О до 630,74 "С температуру /ее определяют по формуле

$$= \ + 0,045$$

$$V419,58°C \qquad),74°C \qquad \textbf{(8.6)}$$

Здесь

$$Uoo^cAioo^c \qquad 'C, \qquad (8.7a)$$

где U7(O=i?(n/i?(0"C).

Константы ***R(Q°C),*** а и б определяют измерением сопротивления в тройной точке воды, точке кипения воды (или затвердевания олова) и точке затвердевания цинка

Уравнение (8.7а) эквивалентно уравнению

$$W\ (Г) = 1 + дг + Bt'^\ , \qquad (8.7б)$$

где Л=а(1-1-е/100°С), S=—Ю-^аб,

Для области от 630,74 до 1064,43 °С температуру «ее определяют по уравнению

$$= \ , \qquad \textbf{(8.8)}$$

где £(^8)—ЭДС эталонного платинородий-(Р1-1-107о Rh)-платинового термоэлектрического термометра, один спай которого находится при О "С, а другой — при температуре /68", а, Ь, с—константы, вычисляемые по значениям Eites) при температуре 630,74+0,2 "С, измеряемой платиновым термометром сопротивления, и в точках затвердевания серебра и золота.

Для области выше 1064,43 °С (1337,58 К) температуру ies (^68=Г68—273,15 К) определяют по уравнению

$$\frac{C2\ \ l}{JTes\ (Au)} \text{—}\ 1 \qquad (8.9)$$

$$\frac{\ }{^Tesi} \text{—}\ 1$$

где 4 (Tes) и L^ (7"бз(Аи))—спектральные плотности энергии излучения черного тела для длины волны (в вакууме) Я при температуре Теа и в точке затвердевания золота ***Tee*** (Au); С2=0,014388 м-К.

Наряду с основными реперными точками МПТШ—68 имеются и другие реперные точки. Некоторые из них и их температуры по МПТШ—68 указаны в табл. 8.4.

Приведенное описание МПТШ—68 (редакция 1975 г.) не является полным. Полный текст см. в [13—15], дополнительная информация имеется в [83].

Таблица 8.1. Основные реперные (постоянные) точки МПТШ-68 [15] и реперные точки ПТШ-76 [19]

Вещество и состояние равновесия				Приписанное значение температуры		
				Т,. К	и,. °С	К
	Щ Cd	ТСП				0,519
	i zn	ТСП				0,851
	I A1	ТСП		—	–	1,1796
	Ь In	ТСП		–	–	3,4145
	i *He	ТК				4,2221
	» Pb	ТСП				7,1999
	l e - H i	ТТ	(а)	13,81	—259,34	13,8044
	ft ^ – Н .,	РЖП	(а)	*17,042*	—256,108	17,0373
	fte-H^TK		(а)	20,28	—252,87	20,2734
	ft Ne	ТТ	(б)	24,561	—248,589	24,5591
	ft Ne	ТК	(б)	27,102	—246,048	27,102
*	О2	ТТ		54,361	—218,789	
	Ar	ТТ	(Г)	83,798	—189,352	
	О2	ТК	(Г)	90,188	—182,962	
	Н,о	ТТ	(В)	273,16	0,01	
>l;	Н,О	ТК	(В, Д)	373,15	100	
	Sn	Т3	(Д)	505,1181	231,9681	
*	Zn	Т3		692,73	419,58	
*	Ag	Т3		1235,08	961,93	
*	Au	Т3		1337,58	1064,43	–

примечания: ^ Оснопная репернвя точка МПТШ–6;
#-Реперная точка ПТШ-76. 8
Значения температур даны для состояния равновесия при давлении p_o = 101 325 Па (760 мм рт. ст.), за исключением ТТ, РЖП,

а) – е – На – равновесный водород: водород, имеющий свою равновесную орто-пара-концентрацию при данной температуре;
б) – нормальный изотопный состав Ne : 2,7 ммоль "Ne и 92 ммоль 2=Ne на 0.905 моль 2=Ne.
в) – вода должна иметь изотопный состав океанской воды.
г) – Ar ТТ может быть использована вместо О^ ТК.
д) – Sn Т3 может быть использована вместо НjО ТК.

Сокращения:
теп – точка сверхпроводящего перехода: температура перехода между сверхпроводящим и нормальным состоянием в нулевом магнитном поле;
ТТ – тройная точка (равновесие между твердой, жидкой и паро-ообразнои фазами);
ТК – точка кипения (равновесие между жидкой и парообразной фазами);
РЖП – равновесие между жидкой и парообразной фазами при давлении 33360,6 Па (25/76 Ро);
Т3 – точка затвердевания (равновесие Между твердой и жидкой фазами).

Таблица 8.2. Значения стандартной функции В^ККТ-68 (^68) ДЛЯ платиновых термометров сопротивления в области температур от 13,81 до 273,15 К [15]

ККТ-68 (^8) +3.28 V'
К
3,28

I	*"i*	/	
0	38,59276	10	239,50285
I	43,44837	11	524,64944
2	39,10887	12	-319,79981
3	38,69352	13	-787,60686
4	32,56883	14	179,54782
5	24,70158	15	700,42832

/	*"J*	*i*	
6	53,03828	16	29,48666
7	77,35767	17	—335,24378
8	—95,75103	18	—77,25660
9	—223,52892	19	66,76292
		20	24,44911

Стандартная функция 1^кк;Т-68 (^es) при = = 273,15 К переходит в функцию IF (^gg), заданную уравнениями (8.6) и (8.7) для «= 3,9259668.10-» "С» и В = 1,496334° С, таким образом, что при этой температуре совпадают значения функций, их первых и вторых производных.

Таблица 8.3. Заачения (^es) при температурах реперных точек [15]

Реперная точка	ККТ-68		
е——На, тройная точка	13,81	—259,34	0,00141208
в Но, 17,042 К	17,042	—256,108	0,00253445
е — Но, точка кипения	**20,28**	—252,87	0,00448517
Ne, точка кипения	27,102	—246,048	0,01221272
О2, тройная точка	54,361	-218,789	0,09197253
Аг, тройная точка	83,798	-189,352	0,21605705
точка конденсации	90,188	-182,962	0.24379912
НгО, точка таяния льда	273,15	О	1
Нр, точка кипения	373,15	100	1,

Таблица 8.4. Реперные точки [16—18J

Состояние равновесия*!	7-ка,
РЖП равновесного водорода	13,81 < Гее < 2 3
<•=—1	
o_1 = - 101,33782К; «0= 3,940796;	
0^ = 5,43201 • 10-2 К-Ч	
0 2 = - 1,10563 - 10-« К-^	
^ ТТ нормального водорода *(а)*	13,956— 13,958
^ ТК нормального водорода (а)	20,397
^ РЖП нормального водорода (а)	13,956 < Гад < 3 0
2 J	
1п(р/Ро)= S ««^68'.	
i ⟸1	
0..1 = - 102,74982 К:	
оо = 3,994505;	
01= 5,33898. 10-2 К-1;	
1,10563 . 10-4 К-2	
твердого кислорода	23,867
РТП неона (б)	19 < Г б 8 < 24,561

Состояние равновесия*	
c.i =-261,18205 K;	
Co = 10,275895;	
«1=-4,54082 . 10-2 K-i;	
02= 10,35280 - 10-4 K-^	
TT изотопа неона ^^Ne	
^ TT неона (б)	24,546—24,548
>HPЖП неона (б)	24,561—24,563
t 2 .	24,561 <Г б 8<'
! 1п(р/й)= 2 1	
£=—1	
й.1=-244,96075 K;	
Co=10,618417;	
fll=-«,48^135 - 10-2 к-Ч	
«2 = 9,78350- 10-4 K-2	
твердого азота	35,621(0,003)
твердого кислорода	43,800,-43,8015
РПП азота	56<Гда<63,146
1n(p/Po)= i|	
»•—1	
o_1=-861,621597 K;	
o, = 12,189891;	
01=-1,006552- 10-2 K-1	
* TT азота	63,1458—63,146
* TK азота	77,344
* РЖП азота	63,146 < Гее <8 4
2 ,	
1n{p/Po)= 2 «г^бвФ	
i = — t	
ffcln (TJTo);	
Ci=-930,153333 K;	
«0= 13,569758;	
Й1=-3,288437 . 10-4 K-Ч	
Й2= 1,671382 . 10-4 K-2;	
6=-2,36680, Го = 77,344 K	
РПП аргона	8 1 < Г и < 83,798
o .	
1n (p/po) = S	
й-1=-955.992 K; Co= 11,02251	
TT аргон	83,7962—83,8004
	87,294—87,2953
РЖП	83,798<Гв8<87,294
аргона	
1n(P/Po)= 2 агт1	
0.1 = - 894,70028 K;	

Состояние равновесия*»	
йo= 10,593120;	
Ci = —7,87615 • 10-3 K-i	
РЖП кислорода	54,361 <Г , 8 < 9 4
2 ^	
1n(p/po)= 2 «i^ee-b	
+ ***b\n(TJT„,t,***	
= _ 1076,356664 K;	
Co = 13,726967;	
a i= -3,042408 . Ю'^ K-^:	
fl2= 1,169807 • 10-4 K"^;	
й = — 1,6645120; Го = 90,188 K	
TT пропана (В-фаза) (в)	
TT этана	85,515 (0,001)
TT метана	90,348—90,352
TK метана	90,6854-90,6861
TT криптона	111,6567 (0,001)
TK криптона	115,759—115,786
TT ксенона	119,797—119,803
TK ксенона	161,375—161,396
РЖП ксенона	165,054—165,067
	161,391<Го8<С
	<165,054
In ip/p,) = 2 ^iKa	
- 1667,160 K;	
йo= 10,71932;	
—3,747979 . 10-3 K"!	
ТВ двуокисда углерода	194,6707—194,674
РТП двуокисда углерода	170 < Гее < 194,7
2 ,	
1n(p/po)= 2	
c_1= -3900,224 K;	
«o = 28,57660;	
%= -6,687764 . 10-2 K-1	
«2= 1,181504 . 10-4 K-2	
TT двуокисда углерода	216,578—216,581
TT ртути	234,307—234,3083
>|< ТЗ ртути	234,314
TT бромбензола	242,419 (0,010)
>|< Точка таяния льда	273,15
TT феноксибензола	300,02 (0,010)
ТП галлия	302,920—302,922
TT галлия	302,9238—302,9241
ТЗ натрия	370,969
TT бензойной кислоты	395,520 (0,002)
ТП бензойной кислоты	395,533 (0,002)
>|< ТЗ индия	429,784
>|< ТЗ висмута	544, 92
>|< ТЗ кадмия	594,258
ТЗ свинца	600,652
	629,81
% РЖП^ртути	622,15<Г<;8<
	<636,15

Продолжение табл. 8.12

tes = 356,66 + 55,552 ***(p/p„*** — 1) — -23,03 (p/po- — 14,0(p/po —1)3 для ***p*** от 90 до 104 кПа	
ТК серы	717,824
РЖП серы	708,15<Г68<726,15
^ = 444.674+ 69,010(p/po—1)— -27,48 (p/p„ - 1P+ ^ + 19,14 ***(p ! p , - \ f*** для р от 90 до 104 кПа	
>|< ТП медь-алюминиевой эвтектики	821,41
ТЗ сурьмы	903,905
ТЗ алюминия	933,61
ТП медь-серебряной эвтектики	1052,72 (0,10)
ТЗ меди	1358,03 (0.01)
ЯТП (0,653 мкм) железа	1670
ЯТП (0,653 мкм) палладия	1688 (5)
ЯТП (0,997 мкм) титана	1711 (6)
>|< ТЗ никеля	1728
>|< ТЗ кобальта	1768
ЯТП (0,653 мкм) титана	**1800 (6)**
ТП железа	**1808**
>|< ТП палладия	1827 (4)
ЯТП (0,993 мкм) ванадия	1875 (7)
ЯТП (0,650 мкм) циркония	1940
ТП титана	1941,5-1945
ЯТП (0,650 мкм) ванадия	1988 (4)
ЯТП (0,653 мкм) ванадия	1992 (7)
ТЗ платины	2042
ТП циркония	**2128**
^ ТЗ родия	2236
ЯТП (0,650 мкм) рутения	2294 (8)
>|< ТП оксида алюминия (AiaO-j)	2327
ЯТП (0,650 мкм) ниобия	2425-2433
ЯТП (0,653 мкм) молибдена	2528—2531

Продолжение табл. 8.12

Состояние•равновесия*"	Гтв,
ТП рутения	**2607 (10)**
ЯТП (**0,995** мкм) тантала	**2620 (8)**
ТП оксида иттрия (YjOg)	**2712 (12)**
ТЗ иридия	**2720**
>|< ТП ниобия	**2742—2750**
ЯТП (**0,653** мкм) тантала	**2846 (8)**
ТП оксида бериллия (BeO)	**2851 (9)**
>|< ТП молибдена	**2896**
>|< ТП вольфрама	**3695**

~ Вторичная реперная точка МПТШ — 68 (редакция 1975 г; приписанное ей значение температуры выделено жирным шрифтом. Приведенные формулы удобны для расчетов р (Г'в) газов, но оии отличаются от формул, рекомендованных в МПТШ — 68.

Значения температур даны для состояний равновесия при давлении p_o = 101 325 Па (760 мм рт. ст.), за исключением тройных точек и точек, для которых область давлений указана явно.

Для формул, описывающих зависимость р(Гe~), указаны области их применения.

(а> — нормальный водород — водород, ***орто-пара-концентрата*** которого соответствует комнатной температуре: примерно 75'о ***орто-*** и 25% пара-водорода .

(б) — нормальный изотопический состав неона: 2,7 м^юм,г^ Ne н 92 ммоль на 0,905 моль '•*Me.

(в)—значение Гее при 1/F=1 (где F—доля образца в жидкой фазе).

1 ще н и я:

а: ТК - • кипения; ТП — точю затвердевания; — I — р-перехода;

— точка 0 — γ-перехода; РЖП — равновесие между жидкой и парообразной фазами; РТП — равновесие между твердой н парообразной фазами; ЯТП — яркостная температура (для данной длины волны) в точке плавления.

Яркостные температуры определены для образцов, находящихся в вакууме или среде иинертиого газа при атмосферном давлении. Поправки на давление пренебрежимо малы по сравнению с погрешностью измерений.

В целом погрешность реперных точек меньше чем + 0,01 К прн Г< 1000 К; меньше чем + 0,1 К при 1000 К < Г < 1400 К и изменяется в пределах ± 10 К при Г > 1400 К.

Предварительная температурная шкала 1976 года (ПТШ—76) рекомендована Консультативным комитетом по термометрии (ККТ) при Международном бюро мер и весов для использования в диапазоне от 0,5 до 30 К [19]. ККТ разработал эту шкалу в силу того, что температуры, определенные по температурным шкалам, построенным по давлению паров гелия (шкала ^Не 1962 г. [21] и шкала ^Не 1958 г. [20]) и по нижнему участку МПТШ—**68,** существенно отличаются от термодинамической температуры и, кроме того, не согласуются между собой. ПТШ—76 построена с учетом гладкости по отношению к термодинамической шкале и максимального к ней приближения и непрерывности с МПТШ—68 в точке 27,1 К. Реперные точки ПТШ—76 приведены в табл. 8.1. Дополнительную информацию о ПТШ — 76 см.

В 1982 г. ККТ рекомендовал использовать уравнения для зависимости давления насыщенных паров изотопов гелия от температуры Tye [23] (см. также [84]). Эти же уравнения рекомендовано использовать для вычисления Гтб по измеренным значениям давления паров гелия (см. табл. 8.27 и 8.28).

Таблица 8.5. Ориентировочные значения расхождений - «48. ° С, между температурами по МПТШ - 68 и МПТШ-48 [15]

а) Для диапазона температур от —180 до О" С

<68. ° С	приращение температуры,										
	0	— 10	-20	-30	—40	-50	-60	-70	—80	-90	-100
-100	0,022	0,013	0,003	—0,006	-0,013	—0,013	—0,005	0,007	0,012	—	
0	0,000	0,006	0,012	0,018	0,024	0,029	0,032	0,034	0,033	0,029	0,022

Для диапазона температур от О до 1070° С

	Приращение температуры, °С										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,000	-0,004	—0,007	—0,009	—0,010	—0,010	—0,010	—0,008	—0,006	—0,003	0,000
Ю	0,000	0,004	0,007	0,012	0,016	0,020	0,025	0,029	0,034	0,038	0,043
200	0,043	0,047	0,051	0,054	0,058	0,061	0,064	0,067	0,069	0,071	0,073
300	0,073	0,074	0,075	0,076	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,076	0,076
400	0,076	0,075	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,075	0,076	0,077	0,079
500	0,079	0,082	0,085	0,089	0,094	0,100	0,108	0,116	0,126	0,137	0,150
600	0,150	0,165	0,182	0,200	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34	0,36	0,39
700	0,39	0,42	0,45	0,47	0,50	0,53	0,56	0,58	0,61	0,64	0,67
800	0,67	0,70	0,72	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,89	0,92	0,95
900	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07	1,10	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24
1000	1,24	1,27	1,30	1,33	1,36	1,39	1,42	1,44			

в) Для диапазона температур от 1100 до 4000 "С

"С	Приращение температуры, "С										
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1000		1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2
2000	3,2	3,5	3,7	4,0	4,2	4,5	4,8	5,0	5,3	5,6	5,9
3000	5,9	6,2	6,5	6,9	7,2	7,5	7,9	8,2	8,6	9,0	9.3

Таблица 8.6. Расхождения между ПТШ—76 (Г,.) и МПТШ—68 (Гее) [19]

Г», К		**Т,,. к**		**1 Гв8, К**	
13,81	**5,6**	**19,0**	**7,4**	**24,5**	**2,1**
14,0	**4,6**	**19,5**	**7,3**	**25,0**	**1,6**
14,5	**3,0**	**20,0**	**6,9**	**25,5**	**1,1**
15,0	**2,0**	**20,5**	**6,4**	**26,0**	**0,7**
15,5	**2,2**	**21,0**	**5,8**	**26,5**	**0,3**
16,0	**2,6**	**21,5**	**5,3**	**27,0**	**0,0**
16,5	**3,6**	**22,0**	**4,8**	**27,1**	**0,0**
17,0	**4,6**	**22,5**	**4,2**	**28,0**	**0,0**
17,5	**5,6**	**23,0**	**3,7**	**29,0**	**0,0**
18,0	**6,5**	**23,5**	**3,2**	**30,0**	**0,0**
18,5	**7,2**	**24,0**	**2,7**		

Таблица 8.7. Расхождения между ПТШ — 76 (г,g) и шкалами, построенными по давлению паров гелия (Пе. 7'62) [19]

	Ч к ' -	'"сР'К	Гб8, К		Га» - мК	***Ти.***
0,5	-1,9	1,8	-3,9	3,2	—6,6	
0,6	—2,1	2,0	-4,1	3,4	—6,8	
0,8	-2,5	2,2	—4,4	3,6	—7,0	
1,0	-2,9	2,4	-4,9	3,8	—7,0	
1,2	-3,2	2,6	—5,4	4,0	—7,1	
1,4	-3,5	2,8	-5,9	4,2	—7,1	
1,6	—3,7	3,0	-6,3	4,5	—7,1	
		3,2	-6,6	5,0	—7,1	

При.
0,5 до 3.2

Таблица 8. Расхождение между ПТШ — 76 (Г,^) *ли,* воспроизводящимися государственными первичными эталонами (Гд) [22]

и: f-.	S г к f-f		г к.		*и:* г г l		fct: *s*
1,8	—2,1	3,9	-7,0	8,5	+ 1,5	17,0	+4,6
2,0	-3,8	4,2	—6,5	9,0	+4,1	18,0	+4,9
2,2	—4,4	4,5	—5,3	9,5	+5,4	19,0	+5,9
2,4	—4,4	5,0	—5,0	10,0	+ 5,8	20,0	+6,5
2,6	—4,3	5,5	—6,0	11,0	+5,5	21,0	+6,9
3,0	-5,0	6,0	—7,4	12,0	+ 4,5	22,0	+7,0
3,3	—6,1	6,5	—8,1	13,0	+4,2	23,0	+6,4
3,6	—6,9	7,0	—7,1	14,0	+4,3	24,0	+5,9
		7,5	—4,6	15,0	+4,3	25,0	+4,2
		8,0	—1,3	16,0	+4,4	26,0	+3,0
						27,1	+2,0

Наблюдаемое при 27,1 К расхождение 2 мК объясняется различием в реализации точки кипения неона, принятой во ВНИИФТРИ и при построении ПТШ—76. В случае, когда необходимо иметь градуировки термометров. непрерывные в точке 27,1 К (т. е. непрерывно переходящие в МПТШ—68, воспроизводимую государственным первичным эталоном), рекомендуется уменьшить приведенные в таблице поправки на АТ=2,7-10-® К.

8.3. ЖИДКОСТНО-СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Жидкостная термометрия основана на тепловом расширении жидкости. Вследствие различия теплового расширения жидкости и стеклянного (кварцевого) резервуара, в который она заключена, при изменении температуры изменяется длина столбика жидкости, находящейся в капилляре. Температуру определяют по положению мениска относительно шкалы, нанесенной непосредственно на капилляр или на пластинку, жестко соединенную с ним. Жидкостные термометры применяют для измерения температур от —200 до 1200 "С. В табл. 8.9 и 8.10 приведены сведения о свойствах важнейших термометрических жидкостей и стекол, используемых при изготовлении термометров.

Точность измерений зависит от глубины погружения жидкостного термометра в измеряемую среду. Погружать термометр следует до отсчитываемого деления шкалы или до специально нанесенной на шкале черты. Если это невозможно, то вводят поправку на выступающий столбик, равную для термометров, градуированных при полном погружении,

$$\Delta I = la \quad - h),$$

при частичном погружении

=

где <2 —средняя температура выступающего столбика, "С; ti — произведенный отсчет по термометру, "С; /о — температура столбика при градуировке, °С; I — длина выступающего столбика, выраженная в делениях шкалы, °С; а — коэффициент поправки на выступающий столбик, "С-».

Вопросы жидкостной термометрии рассмотрены в [6, 10, 2 4 - Г -

Таблица 8.9. Свойства веществ, используемых в жидкостно-стеклянных термометрах [24]

Вещество	Формула	Р*, 10-»	*t*, °С	
			затвердевания	кипения
Ртуть	Hg	182,5	—38,87	356,7
Таллиевая амальгама		182	- 6 0	От 360 до 1460
Сложная амальгама	8,5 % Tl	180	- 9 0	От 360 до 2000
Галлий		55	29,8	2070
Ацетон	Ga	1310	От —93,9 до —94,9	56,0
Керосин		1150	От —50 до —15	От 200 до 290
Пентан	CO(CH3);,	1550	Ниже —200	От 30 до 40
Петролейный эфир		1220	Ниже —100	От 40 до 70
Спирт этиловый	С в Н "	1100	От —111,8 до —117,3	От 77,7 до 78,4
Спирт метиловый	C2H5OH	1220	От - 9 3 . 8 до —97,8	От 64,2 до 66,0
Сероуглерод	CH3OH	1210	—113,0	46,0
Толуол		1090	От —92,4 до —102,0	От 109,2 до 110,6

3 — коэффициент объемного расширения.

!. 10. Значения коэффициента поправки на выступающий столбик для некоторых жидкостно-стеклянных термометров [24]

Сорт стекла	Жидкость	о, ю-' "С-»	Сорт стекла	Жидкость	о. 10-» *"Ct*
360 (ГОСТ 1224—71)	Ртуть	160	Плавленый кварц	Ртуть	180
500 »	»	165	Стекло при <>0° С	Органическая	1300
650 »		170	Стекло при <<0° С	»	800

Таблица 8.11. Пределы допускаемых погрешностей показаний жидкостно-стеклянных термометров, °С [24]

от	до	Цена деления шкалы, "С							
		0,01	0,02 1 0,05		0,1; 0,2	0.5 i1	' 11	^ 1 1	5; 10
- 3 5	0	± 0 , 0 5	± 0 , 0 8	± 0 , 1 0	± 0 , 3	± 1 , 0	± 1	± 2	± 5
0	100	± 0 , 0 4	± 0 , 0 8	± 0 , 1 0	± 0 , 2	± 1 , 0	=±:1		± 5
100	200		± 0 , 1 0	± 0 , 2 5	± 0 , 4	± 1 , 0	± 2	± 2	± 5
200	300	—		± 0 , 4 0	± 1 , 0	± 2 , 0	- 3	± 4	± 5
300	400	—	—		r t 1 . O	± 3 , 0	:±:4	± 4	± 1 0
400	500	—	—			± 3 , 0	± 5	± 5	± 1 0
500	600	—	—				± 6	± 6	± 1 0
600	650						± 6	± 6	± 1 5

8.4. ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Принцип действия термометров сопротивления (ТС) зависимости электрического сопротивления алпов, сплавов и полупроводников от температуры. 1 определения температуры по измеренному значению ого сопротивления пользуются эмпирическими рмулами или таблицами. Термометры для точных из- ий (с погрешностью менее 0,001 К) — платиновый, ианиевый — градуируют индивидуально. ТС применя- для измерения температур примерно от 0,01 К до flOOT.

Широкое распространение для измерения температур —200 до 750 °С (реже от —260 до 1100°С) получили тиновые ТС (ТСП) благодаря исключительно хоро- л термометрическим свойствам платины [10, И, 24— W, 31-38]. В области от —200 до 200 "С часто приме- медные ТС (ТСМ) [24, 39]. Для ТСП и ТСМ соз- стандартные градуировочные таблицы (табл. 8.12, [113). Характеристики промышленных ТС см. в [24, 33— fl5].

Полупроводниковые ТС используют обычно для изме- ^•ния температур ниже О °С [11, 43, 47]. Основное пре- ^ляющество полупроводниковых ТС состоит в том, что их ;чувствительность гораздо выше чувствительности метал- [лических ТС при низких температурах. В низкотемпера- ^турной термометрии применяют германиевые [И, 35, i>H)-42], угольные [44], арсенид-галлиевые ТС [45].

Наряду с ТС для измерения низких температур раз- ?работаны термодиоды из Ge, Si, GaAs. Термометрическим • параметром таких термометров является напряжение на диоде, смещенном в прямом направлении [46].

Полупроводниковые термометры имеют сложную и плохо воспроизводимую от образца к образцу зависи- мость термометрического параметра от температуры, что не позволяет создать для них стандартные градуировоч- ные характеристики.

8.5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Термоэлектрическая термометрия основана на тем- •пературной зависимости термо-ЭДС ***E),*** возникающей в термопаре — проводнике, состоящем из двух соединен- ;их разнородных электропроводящих элементов (обычно металлических проводников, реже полупроводников). Термопары широко используются для измерения темпе- ратур примерно от 4 до 3000 К.

Погрешность определения температуры с помощью термопар составляет, как правило, несколько Кельвинов, а у некоторых достигает 0,01 К. Точность термопары (дифференциального прибора) зависит от точности под- держания и измерения температуры свободного (репер- ного) спая термопары.

Для определения температуры по измеренной ЭДС пользуются таблицами или эмпирическими формулами. Представленные зависимости ***E(T)*** являются базовыми для градуировки конкретных термопар. Поправочная функция в виде степенного полинома находится по от- клонениям значений ЭДС от табличных в нескольких температурных точках. Градуировочные таблицы стандарт- ных термопар соответствуют реальным в пределах указываемой рабочей погрешности.

Зависимость ***E(t)*** большинства термопар в рабочем диапазоне температур (либо в его части) может быть аппроксимирована полиномом вида $E = \sum_{i=0} C_i t^i$. Коэффициенты полиномов приведены в [10, 60].

Вопросы термоэлектрической термометрии рассмотрены в [6, 25, 49, 52].

Таблица 8.12. Стандартная градуировочная таблица платинового термометра сопротивления [24]

Электрическое сопротивление ТСП ГОСТ 6651—78, отн. ед., ***{R(t)IR*** (0°С)); температура, ***°С*** (МПТШ—68)

	Приращение температуры, °С			
	0,00406			
	0,01022	0,00827	0,00673	0,00555
-240	0,02701	0,02269	**0,01886**	0,01550
-230	0,05487	0,04855	0,04257	0,03696
-220	0,09058	0,08298	0,07559	0,06842
-210	0,13075	0,12248	0,11431	**0,10626**
	0,17307	0,16450	0,15598	0,14751
	0,21657	0,20784	0,19909	0,19035
	0,25986	0,25122	0,25458	0,23392
	0,30279	0,29422		0,27703
160	0,34552	0,33699		0,31992
-150	0,38799	0,37949	0,37101	0,36252
-140	0,43008	0,42168	0,41326	0,40483
-130	0,47195	0,46359	0,45523	0,44686
-120	0,51359	0,50528	0,49696	0,48862
-110	0,55500	0,54673	0,53846	0,53018
-100	0,59621	0,58799	0,57975	0,57151
	0,63724	0,62906	**0,62086**	0,61265
	0,67812	0,66996	0,66179	0,65362
— 70	0,71883	0,71070	0,70256	0,69443
— 60	0,75940	0,75130	0,74319	0,73508
— 50	0,79983	0,79175	0,78368	0,77559
— 40	0,84012	0,83207	0,82402	0,81596
— 30	**0,88028**	0,87226	0,86423	
— 20	0,92032	0,91231	0,90431	o!89631
— 10	0,96022	0,95225	0,94428	0,93629
— 0	**1,00000**	0,99206	0,98411	0,97615
0	**1,00000**	1,00794	1,01587	1,02380
10	1,03965	1,04757	1,05548	1,06339
20	1,07919	1,08708	1,09498	**1,10286**
30	**1,11861**	1,12647	1,13434	1,14220
40	1,15791	1,16575	1,17359	1,18142
50	1,19708	1,20490	1,21271	1,22053
60	1,23613	1,24393	1,25172	1,25951
70	1,27507	1,28283	1,29060	1,29836
80	1,31388	1,32162	1,32936	1,33710
90	1,35256	1,36028	1,36801	1,37572
100	1,39113	1,39883	1,40653	1,41423
110	1,42959	1,43727	1,44494	1,45260
	1,46792	1,47558	1,48322	1,49087
	1,50613	1,51377	1,52138	1,52900
	1,54423	1,55183	1,55943	1,56704
	1,58221	1,58979	1,59736	1,60494
	1,62007	1,62763	1,63518	1,64274
	1,65781	1,66535	1,67288	1,68040
	1,69544	1,70295	1,71045	1,71795
	1,73294	1,74043	1,74791	1,75540
	1,77033	1,77779	1,78525	1,79271
		1,81504	1,82248	1,82991
		1,85217	1,85958	
	1,84475	1,88919	1,89658	
	1,88179	1,92610	1,93347	1 ,'90397
	1,91873	1,96287	1,97021	1,94083
	1,95552	1,99953	**2,00686**	1,97755
	1,99221	2,03608	2,04338	2,01417
	2,02878	2,07251	2,07978	2,05067
	2,06523	2,10883	2,11607	2,08705
	2,10158	2,14503	2,15225	2,12332
	2,13779	**2,18111**	2,18830	2,15947
	2,17390	2,21708	2,22425	2,19550
	2,20988	2,25292	2,26007	2,23142
	2,24576	2,28865	2,29578	2,26723
340	2,28151	2,32427	2,33137	2,30291
350	2,31715			2,33848

Продолжение табл. 8.12

t, °С	Приращение температуры, °С				
	0	2	4	6	8
1020	4,43321	4,43874	4,44426	4,44976	4,45527
1030	4,46077	4,46627	4,47177	4,47726	4,48274
1040	4,48823	4,4937,1	4,49918	4,50464	4,51009
1050	4,51555	4,52100	4,52645	4,53189	4,53732
1060	4,54276	4,54819	4,55361	4,55903	4,56446
1070	4,56987	4,57529	4,58069	4,58610	4,59149
1080	4,59688	4,60226	4,60764	4,61302	4,61839
1090	4,62376	4,62912	4,63448	4,63983	4,64518
1100	4,65052	4,65586	4,66119	4,66652	4,67184

Таблица 8.13. Стандартная градуировочная таблица медного термометра сопротивления [24]

Электрическое сопроттление ТСМ (ГОСТ 6651 —78), отн. ед. ***(R(t)/R(0°Q)t,*** температура, °С (МПТШ—68)

t, °С	Приращение температуры, °С					
	0	2	1 4	6	1	«
—200	0,12160		—	—		—
—190	0,16270	0,15420	0,14590	0,13780		0,12970
—180	0,20610	0,19730	и, 18850	0,17980		0,17120
—170	0,25080	0,24170	0,23270	0,22380		0,21490
—160	0,29620	0,28710	0,27800	0,26890		0,25990
—150	0,34180	0,33270	0,32360	0,31450		0,30530
—140	0,38730	0,37820	0,36920	0,36000		0,35090
—130	0,43210	0,42320	0,41430	0,40530		0,39640
—120	0,47690	0,46800	0,45900	0,45000		0,44100
– ПО	0,52160	0,51260	0,50370	0,49480		0,48590
—100	0,56610	0,55720	0,54830	0,53940		0,53050
— 90	0,61030	0,60150	0,59270	0,58380		0,57490
— 80	0,65420	0,64540	0,63660	0,62790		0,61910
— 70	0,69790	0,68920	0,68050	0,67170		0,66300
— 60	0,74150	0,73280	0,72410	0,71540		0,70670
— 50	0,78480	0,77620	0,76750	0,75880		0,75020
— 40	0,82810	0,81950	0,81080	0,80220		0,79350
— 30	0,87120	0,86260	0,85400	0,84540		0,83670
— 20	0,91420	0,90560	0,89700	0,88840		0,87980
- 10	0,95720	0,94860	0,94000	0,93140		0,92280
— 0	1,00000	0,99144	0,98288	0,97432		0,96576
0	1,00000	1,00856	1,01712	1,02568		1,03424
10	1,04281	1,05138	1,05994	1,06850		1,07707
20	1,08563	1,09419	1,10275	1,11131		1,11988
30	1,12844	1,13700	1,14556	1,15412		1,16268
40	1,17124	1,17980	1,18836	1,19692		1,20548
50	1,21404	1,22260	1,23116	1,23972		1,24828
60	1,25684	1,26540	1,27396	1,28252		1,29107
70	1,29963	1,30819	1,31675	1,32531		1,33386
80	1,34242	1,35098	1,35954	1,36810		1,37666
90	1,38522	1,39377	1,40233	1,41088		1,41945
100	1,42800	1,43656	1,44512	1,45368		1,46224
110	1,47079	1,47935	1,48790	1,49646		1,50502
120	1,51357	1,52213	1,53069	1,53924		1,54780
130	1,55635	1,56491	1,57346	1,58202		1,59058
140	1,59913	1,60769	1,61625	1,62481		1,63336
150	1,64192	1,65048	1,65904	1,66759		1,67615
160	1,68470	1,69326	1,70182	1,71037		1,71893
170	1,72748	1,73604	1,74460	1,75316		1,76171
180	1,77026	1,77882	1,78738	1,79594		1,80449
190	1,81305	1,82160	1,83016	1,83872		1,84727
200	1,85583	–	–	—		–

Обзор термопар для измерения высоких температур см. в [37, 50, 51, 53]. Обширный каталог термопар и обсуждение их характеристик см. в [54. 60].

Продолжение табл. 8.12

д °С					
	0	2	4	6	8
360	2,35267	2,35977	2,36685	2,37393	2,38100
370	2,38807	2,39515	2,40220	2,40926	2,41631
380	2,42336	2,43040	2,43744	2,44447	2,45150
390	2,45853	2,46555	2,47256	2,47957	2,48657
400	2,49358	2,50057	2,50756	2,51455	2,52153
410	2,52852	2,53549	2,54246	2,54942	2,55638
420	2,56333	2,57028	2,57722	2,58416	2,59110
430	2,59803	2,60495	2,61187	2,61879	2,62570
440	2,63260	2,63950	2,64640	2,65330	2,66019
450	2,66707	2,67395	2,68082	2,68769	2,69456
460	2,70142	2,70827	2,71512	2,72196	2,72880
470	2,73564	2,74247	2,74930	2,75611	2,76292
480	2,76975	2,77655	2,78335	2,79014	2,79694
490	2,80372	2,81051	2,81729	2,82406	2,83083
500	2,83760	2,84435	2,85110	2,85785	2,86460
510	2,87134	2,87808	2,88481	2,89152	2,89825
520	2,90496	2,91168	2,91839	2,92508	2,93178
530	2,93847	2,94516	2,95184	2,95852	2,96518
540	2,97185	2,97852	2,98518	2,99182	2,99848
550	3,00511	3,01176	3,01838	3,02502	3,03163
560	3,03826	3,04488	3,05148	3,05809	3,06468
570	3,07128	3,07787	3,08446	3,09104	3,09762
580	3,10418	3,11074	3,11731	3,12386	3,13040
590	3,13694	3,14348	3,15001	3,15655	3,16308
600	3,16960	3,17611	3,18262	**3,19913**	3,19563
610	3,20212	3,20861	3,21510	**3,22158**	3,22806
620	3,23453	3,24100	3,24746	3,25392	3,26037
630	3,26682	3,27325	3,27968	3,28611	3,29253
640	3,29894	3,30536	3,31178	3,31818	3,32458
650	3,33098	3,33737	3,34375	3,35013	3,35650
660	3,36288		3,37560	3,38196	3,38830
670	3,39465	3^40099	3,40732	3,41365	3,41998
680	**3,42631**	3,43263	3,43896	3,44527	3,45158
690	**3,45788**	3,46417	3,47046	3,47674	3,48302
700	3,48931	3,49588	3,50184	3,50810	3,51435
710	3,52061	3,52686	3,53310	3,53934	3,54557
720	3,55180	3,55808	3,56426	3,57048	3,57670
730	3,58291	3,58911	3,59531	3,60149	**3,60768**
740	3,61387	3,62004	3,62621	3,63238	**3,63854**
750	3,64470	3,65085	3,65700	3,66314	3,66928
760	3,67542	3,68156	3,68769	3,69382	3,69994
770	3,70606	3,71218	3,71828	3,72438	3,73047
780	3,73655	3,74265	3,74873	3,75480	3,76087
790	3,76693	3,77300	3,77905	3,78510	3,79114
800	3,79719	3,80322	3,80925	3,81527	3,82129
810	3,82732	3,83334	3,83935	3,84536	3,85137
820	3,85737	3,86335	3,86934	3,87533	3,88130
830	3,88727	3,89323	3,89919	3,90514	3,91110
840	3,91705	3,92300	3,92894	3,93487	3,94079
850	3,94672	3,95264	3,95856	3,96447	3,97037
860	3,97627	3,98217	3,98806	3,99394	3,99982
870	4,00571	4,01158	4,01746	**4,02333**	**4,02919**
880	4,03505	4,04091	4,04675	**4,05258**	**4,05841**
890	4,06425	4,07007	4,07589	**4,08171**	4,08751
900	4,09333	4,09912	4,10493	**4,11072**	4,11652
910	4,12231	4,12808	4,13385	4,13961	4,14537
920	4,15114	4,15690	4,16265	4,16840	4,17414
930	4,17989	4,18561	4,19133	4,19705	4,20277
940	4,20849	4,21420	**4,21991**	4,22561	4,23130
950	4,23699	4,24269	**4,24838**	4,25406	4,25974
960	4,26542	4,27107	4,27672	4,28238	4,28902
970	4,29366	4,29930	4,30494	4,31056	4,31619
980	4,32181	4,32742	4,33303	**4,33863**	4,34422
990	4,34982	4,35542	4,36101	**4,36660**	4,37218
1000	4,37776	4,38332	4,38888	4,39444	4,40000
1010	4,40554	4,41-108	4,41662	4,42215	4,42768

Продолжение табл. 8.12

Таблица 8.14. Значения эксплуатационных характеристик термопар [24, 26, 27, 34, 50, 60]

	Рабочий интервал*, К	Максималь-	Погрешность, К	
Си — константан	10—670 (870)	21 (34,3)	0,1-5	Окислительная, воздух до 470К
Cu-Au+1,9%Co	2—270	10,2	0,1—1,5	Окислительная, воздух
Хромель-Au+1,9% Co	2—270	13,8	0,1—1,5	То же
Cu-Au + 0,07%Fe	2—270	1,7	0,05—0,3	
Хромель-Ли+ 0,07% Fe	2—270	5,2	0,05—0,3	
Си—копель	20—320	6.1	0,1—5	
Fe — константан	70—1000 (1500)	41 (70)	0,5—3	Окислительная до 1000 К, нейтральная
H-Pt + 10% Rh	270—1570 (1870)	13(16,6)	0,5—6	Окислительная
Pt+6% Ph —Pt + 30% Rh	570—1870 (2070)	11 (14)	0,5—7	
Хромель — копель	220—870 (1070)	49 (66)	1—3	Окислительная, нейтральная
Хромель — алюмель	220—1270 (1570)		4-10	То же
W + 5%Re-W + 20%Re	270—2070 (2770)	27 (33,6)	8-30	Вакуум, инертная, слабовосстановительная
Никель — нихром	250—1500	49	1—10	Окислительная
Нихросил — нисил	20—1570	47.5	<10	Окислительная, воздух
Ir-Ir + 60% Rh	500-2400	11.6	10—22	Вакуум, окислительная, слабовосстановительная
	1300-3000	9	10	Вакуум, инертная, восстановительная

* В скобках указаны значения температур, до которых кратковременно можно применять термопары.

Таблица 8.15. Градуировочная таблица низкотемпературных термопар [55, 56]
Температура свободных концов 0°С; константан (ГОСТ 5307—77). 59,9% Си, 40±1 % Ni, 0,5±0,1% Мп; хромель: 90-91 % Ni, 9-10 % Cr

Т, К	Констгштан - Си		AU+1.ъ % Со - Си		AU +1.9% Со-хромель		AU + 0,07 % Fe - Си		Au+0,07 % Fe–хромель	
	Е. мкВ	*dEtdT.* мкВ/К	*Е.* мкВ	*dE/dT.* мкВ/К	*Е.* мкВ	Ж	*Е,* мкВ	*dE/dT.* мкВ/К	Е, мкВ	*dE/dT.* мкВ/К
2	6029,25	—0,100	10263,0	—2,812	13813,0	-2,868	1729,9	-10,875	5262,7	—11,05
3	6029,00	—0,412	10259,7	-3,718	13809,5	-3,985	1718,6	—11,676	5251,2	—12,08
4	6028,43	—0,719	10255,5	—4,609	13805,0	—5,077	1706,6	—12,38	5238,6	—12,97
5	6027,56	—1,023	10250,5	—5,486	13799,4	—6,144	1693,9	-12,97	5225,3	-13,73
6	6026,39	—1,323	10244,6	—6,349	13792,7	—7,188	1680,7	—13,48	5211,2	—14,38
7	6024,91	—1,620	10237,8	—7,197	13785,0	—8,210	1667,0	—13,90	5196,5	—14,93
8	6023,15	—1,913	10230,2	—8,031	13776,3	—9,209	1652,9	—14,23	5181,4	—15,39
9	6021,09	—2,203	10221,7	—8,849	13766,6	—10,19	1638,5	-14,48	5165,8	—15,77
10	6018,7	—2,489	10212,5	-9,653	13755,9	—11,14	1624,0	—14,67	5149,8	—16,08
12	6013,2	—3,051	10191,6	—11,22	13731,8	—13,00	1594,4	-14,86	5117,2	—16,52
14	6006,6	-3,599	10167,6	—12,72	13704,0	—14,77	1564,7	-14,85	5083,9	-16,77
16	5998,8	-4,134	10140,7	—14,17	13672,7	—16,47	1535,1	—14,70	5050,2	—16,88
18	5990,0	—4,657	10111,0	—15,56	13638,2	—18,10	1505,9	-14,45	5016,4	—16,90
20	5980,2	—5,166	10078,6	—16,89	13600,4	—19,67	1477,3	—14,14	4982,6	-16,85
22	5969,4	—5,663	10043,5	—18,16	13559,5	—21,17	1449,4	—13,81	4949,0	—16,77
24	5957,6	—6,149	10006,0	—19,38	13515,7	—22,62	1422,1	-13,47	4915,6	—16,67
26	5944,8	—6,622	9966,0	—20,55	13469,1	—24,00	1395,5	—13,16	4882,4	—16,56
28	5931,1	—7,084	9923,8	—21,66	13419,8	—25,34	1369,5	—12,87	4849,3	—16,46
30	5916,5	—7,535	9879,4	-22,72	13367,8	—26,62	1344,0	—12,59	4816,5	—16,37
32	5900,9	—7,975	9833,0	-23,73	13313,3	—27,85	1319,1	—12,31	4783,9	—16,30
34	5884,6	—8,405	9784,5	—24,69	13256,4	—29,04	1294,8	—12,05	4751,3	—16,25
36	5867,3	—8,824	9734,2	—25,61	13197,2	—30,18	1270,9	—11,80	4718,9	—16,22
38	5849,3	—9,234	9682,1	—26,48	13135,7	—31,28	1247,6	—11,55	4686,4	—16,20
40	5830,4	—9.634	9628,3	—27,31	13072,1	—32,34	1224,7	—11,32	4654,0	-16,21
45	5779,8	—10,60	9486,9	—29,21	12904,1	—34,82	1169,5	—10,77	4572,8	—16,28
50	5724,5	—11,50	9336,6	—30,87	12724,3	—37,09	1116,9	—10,28	4491,1	—16,43
55	5664,8	—12,37	9178,6	—32,33	12533,5	—39,17	1066,7	-9,819	4408,5	—16,62
60	5601,0	—13,18	9013,7	—33,61	12332,9	—41,06	1018,6	—9,399	4324,8	—16,86
65	5533,1	-13,96	8842,8	—34,73	12123,2	—42,81	972,62	—9,008	4239,9	—17,08

Продолжение табл. **9.10**

Константан — Си		Au + 1,9 % Co - Cu		Аи+1,9 % Со — хромель		Аи + 0,07 % Fe - Си		Аи+0,07% Fe—хромель	
		E, мкВ	*dE/dT*, мкВ/К	*E*, мкВ	*dE/dT*, мкВ/К	*E*, мкВ	*dE/dT*, мкВ/К	*E*, мкВ	*dE/dT*, мкВ/К
	5461,4	-14,71	8666,6	—35,71	11905,1	—44,41	928,37	—8,630	4153,8	—17,34
	5386.0	—15,43	8485,9	-36,58	11679,3	—45,87	886,12	-8,273	4066,4	-17,60
	5307.1	**-16,12**	8301,0	—37,35	11446,5	—47,23	845,60	—7,939	3977,8	—17,84
	5224.8	—16,79	8112,5	—38,04	H207,2	—48,47	806,70	—7,624	3888,0	—18,06
	5139.2	-17,44	7920,7	—38,65	10962,0	—49,62	769,33	—7,328	3797.2	— 18,27
95	5050,4	**—18,08**	7726,1	-39,21	10711,2	—50,67	733,39	—7,048	3705,4	—18,46
100	4958,4	—18,71	7528,8	—39,71	**10455,4**	-51,65	698,82	-6,783	3612,6	—18,65
ПО	4765.2	—19,93	7127,2	—40,58	**9929,9**	—53,40	633,48	-6,293	3424,3	—19,01
120	4559.9	—21,13	6717,7	—41,31	9388,2	—54,91	572,79	—5,851	3232,5	—19,35
130	4342.6	-23,51	6301,3	—41,93	8832,4	—56,22	516,31	—5,452	3037,4	—19,67
140	4113,4	—24,70	5879,3	—42,46	8264,3	—57,39	463,64	—5,090	2839,2	—19,97
150	3872.3	-25,88	5452,5	—42,90	7685,1	—58,43	414,41	—4,762	2638,0	—20,26
160	3619.4	-27,05	5021,6	—43,27	7096,1	—59,36	368,30	—4,464	2434,2	—20,52
170	3354.7	**-28,21**	4587,2	—43,59	6498,2	—60,21	325,64	—4,193	2227,8	—20,75
180	3078,4	—29,34	4150,0	—43,86	5892,2	—60,97	284,37	—3,944	2019,2	—20,97
190	2790.7	—30,43	**3710,1**	—44,10	5279,0	—61,66	246,10	-3,713	1808,5	—21,16
200	2491.8	—31,48	**3268,1**	—44,30	4659,3	—62,27	210,06	—3,497	1596,0	—21,34
210	**2182,2**	—32,50	**2824,3**	—44,46	4033,9	—62,80	176,12	—3,293	1381,7	—21,52
220	1862.3	-33,47	**2379,1**	—44,57	3403,5	—63,26	144,17	-3,099	1165,7	—21,68
230	1532.4	—34,41	1933,0	—44,63	2768,9	**-63,65**	114,10	—2,918	948,13	—21,83
240	1193,1	—35,35	1486,6	—44,64	2130,9	**—63,96**	85,76	-2,754	729,14	—21,96
250	844,3	-36,31	1040,2	—44,65	1490,0	—64,20	58,93	—2,619	**509,07**	—22,04
260	486,1	—37,36	593,3	-44,76	847,2	—64,36	33,24	—2,529	**288,58**	**—22,04**
270	117,8	—37,70	143,8	—45,24	203,3	-64,40	8,12	—2,510	68,87	
273	5.2		7,7	—45,51	10,1	—64,38			3,37	—21 ,'79

Таблица 8.16. Стандартная градуировочная таблица термопары медь — копель (ГОСТ 22666—77) [60]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0°С; допускаемые отклонения 3—1,1 . *\0-Ч)йЕ1<и,* мВ; электроды: медь электролитическая рафинированная чистотои 99,9Ь/о, содержащая 0,02—0.07% Ог и не более 0,01 % других примесей

t, "С	Приращение температуры, °С					*t*, "С	приращение температуры.				
	0	2	4	а	в						
200	6,154					-80	3,065	3,133	3,199	3,266	3,331
—190	5,975	6,012	6,048	6,084	6,119	—70	2,722	2,792	**2,861**	2,930	2,998
— 180	5,781	5,821	5,860	5,899	5,937	—60	2,367	2,439	2,510	2,582	2,652
— 170	5,572	5,615	5,657	5,699	5,740	—50	**2,000**	2,074	2,148	**2,222**	2,295
—160	5,349		5,440	5,484	5,529	—40	**1,622**	1,698	1,774	1,850	1,925
— 150	5,111	5; 159	5,208	5,255	5,302	—30	1,232	1,311	1,389	1,467	1,545
—140	4,859	4,910	4,961	5,012	5,061	—20	0,832	0,913	0,993	1,074	1,153
—130	4,593	4,647	4,701	4,754	4,807	—10	0,421	0,504	0,587	0,669	0,751
—120	4,313	4,370	4,427	4,483	4,538	0	**0,000**	0,085	0,170	0,254	0,338
– ПО	4,021	4,080	4,139	4,198	4,256						
—100	3,715	3,777	3,839	3,900	3,961						
— 90	3,396	3,461	3,525	3,589	3,652						

Примечание. Для аппроксимации зависимости термо-ЭДС *E*, мкВ, от температуры *t*, *'С. ь* области температур от ^ С в [57] предлагается полином е ^ aj , гм = - 42,65243 "С-; = - 4 . 9 5 3 8 - а » = 4.9.1(Г»

1=1

Таблица 8.17. Градуировочная таблица термопары железо — константан [60]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов О °С: константан: 55—61 %Си, 45-39% № с малыми добавками Мп, Fe и с примесями С, Si, Co, Mg; железо: технически чистое безуглеродистое, примеси: 0,02—0,10' С, не более 0,4% Мп, не более 0,15 % Си, от 0,005 до 0,02 % Si, S, Ni, Cr, P

t, °С	Приращение температуры, '•С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	— 7.890									
-'00	- 4,632	- 5,036	— 5,426	— 5.801	— 6,159	— 6,499	— 6,821	— 7,122	— 7,402	— 7,659
- 0	0,000	— 0,501	— 0,995	— 1,481	— 1,960	— 2,431	— 2,892	— 3,344	- 3,785	— 4,215
0	0,000	0.507	1,019	1,536	2.058	2,585	3,115	3,649	4,186	4,725
100	5.268	5,812	6,359	6,907	7.457	8,008	8,560	9,113	9,667	10,222
200	10,777	11,332	11,887	12,442	12,998	13,533	14,108	14,663	15,217	15,771
300	16,325	16.879	17,432	17.984	18,537	19,089	19,640	20.192	20.743	21,295
400	21,846	22,397	22,949	23,501	24,054	24,607	25,161	25,716	26,272	26,829
500	27,388	27,949	28,511	29,075	29,642	30,210	30,782	31,356	31,933	32,513
600	33,096	33.683	34,273	34,867	35.464	36,066	36,671	37,280	37,893	38,510
700	39,130	39.754	40,382	41,013	41.647	42,283	42,922	43,563	44,207	44,852
800	45,498	46,144	46,790	47.434	48,076	48,716	49,354	49,989	50,621	51,249
900	51.875	52,496	53,115	53,729	54,341	54,948	55,553	56,155	56,753	57,349
1000	57.942	58,533	59,121	55,708	60,293	60.876	61,459	62,039	62,619	63,199
1100	63.777	64,355	64,933	65,510	66,087	66,664	67.240	67,815	68,390	68,964
1200	69,536									

Таблица 8.18. Градуировочная таблица термопары медь — константан [60]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0°С; медь: электролитическая рафинированная чистотой 99,95 %, содержащая 0,02—0,07 % Og и 0,01 % примесей; константан: 55—61 % Си, 45-39% Ni с малыми добавками Мп, Fe и с примесями С, Si, Co, Mg

°С	приращение температуры, °С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	—5,603									
-100	—3,378	—3,656	—3,923	—4,177	—4,419	—4,648	—4,865	-5,069	—5,261	—5,439
- 0	0,000	—0,383	—0,757	—1,121	—1,475	—1,819	—2,152	—2,475	-2,788	
0	0,000	0,391	0,789	1,196	1,611	2.035	2,467	2,908	3,357	3,'813
100	4,277	4,749	5,227	5,712	6,204	6,702	7,207	7,718	8,235	8,757
200	9,286	9,820	10,360	10.905	11,456	12,011	12,572	13,137	13,707	14,281
300	14,860	15,443	16,030	16,621	17,217	17,816	18,420	19,027	19,638	20,252
400	20,869									

Таблица 8.19. Стандартная градуировочная таблица термопары ?фомель—копель [58]

Термо-ЭДС. мВ; температура, °С (МПТШ—68): температура свободных концов 0° С; предел допускаемых отклонений 0,2 мВ при <<300°С и [0.2+6,0 • 10-^ (<—300)] мВ при О 300° С; электроды: хромель НХ 9.5; копель МНМц 43—0.5

и -с	Приращение температуры, °С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
- 0	— 0.000	— 0,640	- 1,270	— 1,890	— 2,500	— 3,110				
0	0,000	0,646	1,303	1,976	2,658	3,350	4,050	4,760	5Д69	6,179
100	6.898	7.627	8,366	9,115	9,865	10.624	11,393	12,172	12,961	13,760
200	14,570	15.380	16,200	17,030	17,860	18,690	19,520	20,360	21,200	22,040
300	22,880	23,720	24,560	25,410	26,270	27,130	28,000	28,870	29,740	30,610
400	31,480	32,350	33,230	34,110	34,990	35,870	36,750	37,630	38,510	39,390
500	40,270	41,150	42,030	42,910	43,790	44,670	45,550	46,440	47,330	48,210
600	49,090	49,970	50,850	51,730	52,610	53,480	54,350	55,220	56,090	56,960
700	57,820	58,680	59,540	60,400	61,260	62,120	62,980	63,840	64,700	65,560
800	66,420									

Таблица 8.20. Стандартная градуировочная таблица термопары хромель — алюмель [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0°С; предел допускаемых отклонений 0,16 мВ при 300° С и [0,16 + 2 , 0 • 10"» 300)] мВ при О 300° С; электроды: хромель НХ 9,5; алюмель НМц АК 2—2—1

i, "C	Приращение температуры, °С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—0	—0,000	—0,392	—0,777	-1,156	—1,527	-1,889	—	—	—	—
0	0,000	0,397	0,798	1,203	1,611	2',022	2,436	2,850	3,266	3,681
100	4,095	4,508	4,919	5,327	5,733	6,137	6,539	6,939	7,338	7,737
200	8,137	8,537	8,938	9,341	9,745	10,151	10,560	10,969	11,381	11,793
300	12,207	12,623	13,039	13,456	13,874	14,292	14,712	15,132	15,552	15,974
400	16,395	16,818	17,241	17,664	18,088	18,513	18,938	19,363	19,788	20,214
500	20,640	21,066	21,493	21,919	22,346	22,772	23,198	23,624	24,050	24,476
600	24,902	25,327	25,751	26,176	26,599	27,022	27,445	27,867	28,288	28,709
700	29,128	29,547	29,965	30,383	30,799	31,214	31,629	32,042	32,455	32,866
800	33,277	33,686	34,095	34,502	34,909	35,314	35,718	36,121	36,524	36,925
900	37,325	37,724	38,122	38,519	38,915	39,310	39,703	40,096	40,488	40,879
1000	41,269	41,657	42,045	42,432	42,817	43,202	43,585	43,968	44,349	44,729
1100	45,108	45,486	45,863	46,238	46,612	46,985	47,356	47,726	48,095	48,462
1200		49,192	49,555	49,916	50,276	50,633	50,990	51,344	51,697	52,049
1300	52!398									

Таблица 8.21. Стандартная градуировочная таблица термопары Pt — Pt + 10 % Rh [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, *"С* (МПТШ—68); температура свободных концов 0°С; предел допускаемых отклонений 0,01 мВ при t<300°С и [0,01+2.5- Ю-" 300)] мВ при <>300°С

	Приращение температуры, °С					*t*, °С	Приращение температуры, °С				
	0		<	6	8		0	2	4	6	8
0	0,000	0,011	0,022	0,033	0,044	340	2,684	2,702	2,721	2,739	2,758
10	0,056	0,067	0,078	0,090	0,101	350	2,777	2,795	2,814	2,833	2,852
20	0,113	0,125	0,137	0,149	0,161	360	2,871	2,889	2,908	2,927	2,946
30	0,173	0,185	0,197	0,209	0,221	370	2,965	2,984	3,003	3,022	3,041
40	0,234	0,247	0,259	0,272	0,285	380	3,060	3,079	3,098	3,117	3,136
50	0,297	0,310	0,324	0,337	0,350	390	3,155	3,174	3,193	3,212	3,231
60	0,363	0,377	0,390	0,404	0,418	400	3,250	3,269	3,288	3,307	3,326
70	0,431	0,445	0,459	0,473	0,487	410	3,345	3,364	3,383	3,402	3,421
80	0,501	0,515	0,529	0,543	0,557	420	3,440	3,459	3,478	3,498	3,517
90	0,572	0,586	0,601	0,615	0,629	430	3,536	3,555	3,574	3,594	3,613
100	0,644	0,658	0,673	0,688	0,702	440	3,632	3,651	3,670	3,690	3,709
110	0,717	0,732	0.747	0,762	0,777	450	3,728	3,748	3,767	3,787	3,806
120	0,792	0,807	0,822	0,838	0,853	460	3,825	3,844	3,864	3,883	3,902
130	0,869	0,884	0,900	0,916	0,931	470	3,922	3,942	3,961	3,981	4,000
m	0,947	0,962	0.978	0,994	1,010	480	4,020	4,040	4,059	4,079	4,098
150	1,026	1,042	1,058	1,074	1,090	490	4,118	4,138	4,157	4,177	4,196
160	1,106	1,122	1.138	1,154	1,171	500	4,216	4,236	4,256	4,275	4,295
170	1,187	1,203	1,220	1,236	1,253	510	4,315	4,335	4,355	4,374	4,394
180	1,269	**1,286**	1,302	1,319	1,336	520	4,414	4,434	4,454	4,474	4,494
190	1,352		1,386	1,402	1,419	530	4,514	4,534	4,554	4,574	4,594
200	1,436	Ь453	1,470	1,487	1,504	540	4,614	4,634	4,654	4,674	4,694
210	1,521	1,538	1,555	1,572	1,589	550	4,714	4,734	4,754	4,774	4,794
220	1,606	1,623	1,640	1,658	1,675	560	4,814	4,834	4,854	4,874	4,894
230		1,710	1,727	1,744	1,762	570	4,914	4,934	4,955	4,975	4,995
240	Ь779	**1,797**	1,814	1,832	1,850	580	5,015	5,035	5,055	5,076	5,096
250	1,867	**1,885**	1,902	1,920	1,938	590	5,116	5,136	5,156	5,176	5,197
260	1,955	1,973	1,990	2,008	2,026	600	5,218	5,238	5,259	5,279	5,300
270	2,043	2,061	2,079	2,097	2,115	610	5,320	5,340	5,361	5,381	5,402
280	2,133	2,151	2,169	2,187	2,205	620	5,422	5,442	5,463	5,484	5,504
290	2,223	2,241	2,259	2,277	2,295	630	5,525	5,546	5,566	5,587	5,608
300	2,314	2,332	2,350	2,369	2,387	640	5,628	5,649	5,669	5,690	5,711
310	2,406	2,424	2,442	2,461	2,479	650	5,731	5,752	5,773	5,793	5,814
320	2,498	2,516	2,535	2,553	2,572	660	5,835	5,856	5,876	**5,897**	5,918
330	2,591	2,609	2,628	2,646	2,665	670	5,939	5,960	5,981	**6,001**	6,022

Продолжение таОл. 8.21

I. с	приращение температуры, "С					*t.* "С	Приращение температуры, *"С*				
	0	2	4		8		0	2	4	6	8
680	6,043	6,064	6,085	6,106	6,127	1150	11,306	11,330	11,354	11,378	11,401
	6,148	6,169	6,190	6,211	6,232	1160	11,425	11,449	11,473	11,497	11,520
700	6,253	6,274	6,295	6,316	6,337	1170	11,544	11,568	11,592	11,616	11,640
710	6,358	6,379	6,400	6,421	6,442	1180	11,664	11,688	11,712	11,736	11,760
720	6,463	6,484	6,505	6,526	6,547	1190	11.784	11,808	11,832	11,856	11,880
730	6,568	6,589	6,610	6,632	6,653	1200	11,904	11,928	11,952	11,976	12,000
740	6,674	6,695	6,717	6,738	6,759	1210	12,024	12,048	12,072	12,096	12,120
750	**6,780**	6,802	6,823	6,844	6,866	1220	12,144	12,168	12,192	12,216	12,240
760	**6,887**	6,909	6,930	6,951	6,973	1230	12,264	12,288	12,312	12,336	12,360
770	6,994	7,016	7,037	7,058	7,080	1240	12,384	12,408	12,432	12,456	12,480
780	7,101	7,123	7,144	7,166	7,188	1250	12,504	12,528	12,552	12,576	12,600
790	7,209	7,231	7,252	7,274	7,296	1260	12,624	12,648	12,672	12,696	12,720
800	7,317	7,339	7,361	7,383	7,405	1270	12,744	12,768	12,792	12,816	12,840
810	7,426	7,448	7,470	7,492	7,514	1280	12,865	12,889	12,913	12,937	12,961
820	7,535	7,557	7,579	7,601	7,623	1290	12,986	13,010	13,034	13,058	13,082
830	7,645	7,667	7,689	7,711	7,733	1300	13,107	13,131	13,155	13,179	13,203
840	7,754	7,776	7,798	7,820	7,842	1310	13,228	13,252	13,276	13,300	13,324
850	7,864	7,886	7,908	7,930	7,952	1320	13,349	13,373	13,397	13,421	13.445
860	**7,974**	7,996	8,018	8,040	8,062	1330	13,470	13,494	13,518	13,542	13,566
870	**8.084**	8,106	8,128	8,150	8,172	1340	13,591	13,615	13,639	13,663	13,687
880	8,194	8,216	8,238	8,260	8,282	1350	13,712	**13,736**	13,760	13,784	13,808
890	8,305	8,327	8,349	8,371	8,393	1360	13,833	**13,857**	13,881	13,905	13,929
900	8,416	8,438	8,460	8,482	8,504	1370	13,954	13,978	14,002	14,026	14,050
910	8,527	8,549	8,571	8,594	8,616	1380	14,075	14,099	14,123	14,147	14,171
920	8,639	8,661	8,683	8,706	8,728	1390	14,195	14,219	14,243	14,267	14,291
930	8,751	8,773	8,796	8,818	8,841	1400	14,315	14,339	14,363	14,387	14,411
940	8,864	8,887	8,909	8,932	8,955	1410	14,435	14,459	14,483	14,507	14,531
950	8,978	9,001	9,023	9,046	9,069	1420	14,554	14,578	14,602	14,626	14,650
960	9,092	9,115	9,137	9,160	9,183	1430	14,674	14,698	14,722	14,746	14,770
970	9,206	9,229	9,251	9,274	9,297	1440	14,794	14,818	14,842	14,866	14,890
980	9,320	9,343	9,366	9,389	9,412	1450	14,914	14,938	14,962	14,986	15,010
990	9,435	9,458	9,481	9,504	9,527	1460	15.034	15,058	15,082	15,106	15,130
1000	9,550	9,573	9,596	9,619	9,642	1470	15,154	15,178	15,202	15,226	15,250
1010	9,665	9,688	9,711	9,734	9,757	1480	15,273	15,297	15,321	15,345	15,369
1020	9,780	9,803	9,826	9,849	9,872	1490	15,392	15,416	15,440	15.464	15,487
1030	9,895	9,918	9,941	9,965	9,988	1500	15,511	15,535	15,559	15,583	15,607
1040	10,011	10,036	10,058	10,081	10,105	1510	15,630	15,654	15,678	15,702	15,726
1050	10,128	10.152	10,175	10,198	10,222	1520	15,749	15,773	15,796	15.820	15,844
1060	10.245	10,269	10,292	10,315	10,339	1530	15,867	15,891	15,914	15,938	15,962
1070	10,362	10,385	10,409	10,432	10,455	1540	15,985	16,009	16,032	16,055	16,079
1080	10,479	10,502	10,526	10,549	10,572	1550	16,102	16,126	16,149	16,172	16,196
1090	10,596	10,620	10,643	10,667	10,690	1560	16,219	16,243	16,266	16,289	16,313
1100	10,714	10,738	10,761	10,785	10,808	1570	16,336	16,360	16,383	16,406	16,430
1110	10,832	10.856	10,879	10,903	10,926	1580	16,453	i6,476	16,500	16,523	16,546
1120	10,950	10.974	10,997	11,021	11,044	1590	16,569	16,593	16,616	16,639	16,662
ИЗО	11,068	11,092	10,116	11,140	11,163	1600	16,685				
1140	11,187	11,211	11,235	11,259	11,282						

Таблица 8.22. Стандартная градуировочная таблица термопары Pt + 6 % Rh — Pf + 30 % Rh [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С; предел допускаемых отклонений 0,01 мВ при <<300°С и [0,01+3,3 • 10"^ —300)] мВ при <>300°С

t. "С	Приращение температуры, *"С*									
	0	В	10	15	20	25	30	35	40	45
300	0,443	0.459	0,475	0,491	0,508	0,525	0,542	0,559	0,577	0,595
350	0,613	0,632	0,650	0,669	0,688	0,707	0,727	0,747	0,767	0,787
400	0,808	0,829	0,850	0,871	0,893	0,915	0,938	0,960	0,983	1,006
450	1,029	1,053	1,076	1,100	1,124	1,148	1,173	1,198	1,223	1,248
500	1,274	1,299	1,325	1,351	1,377	1,403	1,430	1,457	1,484	1,512

Продолжение табл. 9.10

	Приращение температуры, °С									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
550	1,540	1,568	1,596	1,625	1,653	1,682	1,710	1,740	1,770	1,800
600	1,830	1,860	1,891	1,922	1,953	1,984	2,015	2,046	2,078	2,110
650	2,142	2,174	2,207	2,239	2,272	2,305	2,839	2,373	2,407	2,441
700	2,476	2,511	2,546	2,581	2,616	2,651	2,687	2,723	2,759	2,795
750	2,832	2,868	2,906	2,943	2,981	3,019	3,057	3,095	3,132	3,170
800	3,208	3,247	3,287	3,327	3,367	3,407	3,447	3,487	3,527	3,567
850	3,608	3,649		3,731	3,773	3,815	3,856	3,898	3,940	3,982
900	4,025	4,068	4', 111	4,155	4,198	4,241	4,285	4,329	4,373	4,417
950	4,462	4,507	4,552	4,597	4,642	4,687	4,732	4,778	4,824	4,870
1000	4,916	4,962	5,009	5,055	5,102	5,149	5,196	5,243	5,291	5,339
1050	5,387	5,436	5,484	5,533	5,582	5,631	5,680	5,729	5,778	5,828
1100	5,878	5,928	5,978	6,028	6,078	6,129	6,180	6,231	6,282	6,333
1150	6,384	6,435	6,487	6,538	6,590	6,642	6,694	6,747	6,799	6,852
1200	6,904	6,957	7,010	7,064	7,117	7,170	7,224	7,277	7,331	7,385
1250	7.439	7,493	7,547	7,601	7,655	7,709	7,764	7,819	7,873	7,928
1300	7,982	8,037	8,092	8,147	8,203	8,259	8,315	8,371	8,427	8,483
1350	8,539	8,595	8,652	8,708	8,765	8,822	8,878	8,935	8,992	9,048
1400	9,106	9,162	9,220	9,276	9,334	9,390	9,448	9,505	9,563	9,621
J450	9,679	9,737	9,795	9,853	9,911	9,969	10,027	10,085	10,143	10,201
1500	10,259	10,318	10,376	10,434	10,493	10.551	10,610	10,668	10.727	10,785
1550	10,844	10,902	10,961	11,019	11,078	11,136	11,195	11,253	11,312	11,370
1600	11,429	11,487	11,546	11,604	11,663	11,721	11,780	11,838	11,897	11,955
1650	12,014	12,072	12,131	12,190	12,249	12,308	12,367	12,426	12,485	12,544
1700	12,603	12,662	12,721	12,780	12,839	12,898	12,957	13,016	13,075	13,134
1750	13,193	13,252	13,310	13,369	13,427	13,486	13,544	13,603	13,661	13,720
1800	13,778	–	–	–	–	–	–	–	–	

Таблица 8.23. Стандартная градуировочная таблица термопары W + 5 % Re —W + 20 % Re [58] (градуировочная характеристика

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С; предел допускаемых отклонений 0,08 мВ при *tc* 1000° С и [0,08 + 4,0- *10'^ (t — WOO)]* мВ при <> 1000°С

t, " С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	0,124	0,250	0,378	0,508	0,640	0,774	0,910	1,048	1,188
100	1,330	1,475	1,622	1,771	1,922	2,075	2,230	2,387	2,546	2,707
200	2,869	3,032	3,195	3,359	3,523	3,688	3,853	4,019	4,185	4,352
300	4,519	4,687	4,855	5,024	5,193	5,362	5,531	5,700	5,869	6,039
400	6,209	6,379	6,549	6,719	6,889	7,059	7,229	7,399	7,569	7,739
500	7,909	8,078	8,247	8,416	8,585	8,754	8,923	9,092	9,261	9,430
600	9,598	9,765	9,933	10,101	10,269	10,437	10,605	10,772	10,939	11,106
700	11,273	11,440	11,606	11,772	11,938	12,104	12,269	12,434	12,599	12,764
800	12,929	13,093	13,257	13,421	13,584	13,747	13,910	14,072	14,234	14,395
900	14,556	14,716	14,876	15,035	15,194	15,352	15,510	15,667	15,824	15,980
1000	16,136	16,291	16,446	16,600	16,754	16,907	17,060	17,212	17,364	17,515
1100	17,666	17,816	17,966	18,115	18,264	18,412	18,560	18,707	18,854	19,000
1200	19,146	19,291	19,436	19,580	19,724	19,867	20,010	20,152	20,294	20,435
1300	20,576	20,716	20,856	20,996	21,135	21,274	21,413	21,551	21,689	21,826
1400	21,963	22,099	22,235	22,370	22,505	22,639	22,773	22,906	23,039	23,171
1500	23,303	23,434	23,565	23,695	23,825	23,954	24,083	24,211	24,338	24,464
1600	24,590	24,715	24,840	24,964	25,088	25,211	25,334	25,456	25,578	
1700	25,820	25,940	26,060	26,179	26,298	26,416	26,534	26,651	26,768	26,'884
ШО	26,999									

в [58] приведены таиже граду характеристики 2 и 3, незначительно отличающиеся от характеристики 3,.

Таблица 8.24. Градуировочная таблица термопары W + 5 % Re —W + 20 % Re для диапазона температур от 1800 до 2500° С [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С

I, "С	Приращение температуры. *"С*									
	0	10	20	30	40	50	ее	70	80	90
1800	26,999	27,113	27,226	27,339	27,451	27,563	27,675	27,786	27,,897	28,007
1900	28,117	28,226	28,334	28,442	28,549	28,656	28,762	28,867	28:,971	29,074
2000	29,177	29,279	29,381	29,483	29,584	29,685	29,786	29,886	29,,986	30,086
2100	30,185	30,284	30,382	30,479	30,575	30,670	30,765	30,859	30,,952	31,044
2200	31,136	31,227	31,318	31,408	31,498	31,587	31,676	31,764	31 ,852	31,939
2300	32,026	32,112	32,197	32,281	32,365	32,448	32,531	32,613	32,,695	32,776
2400	32,857	32,937	33,017	33,096	33,175	33,253	33,331	33,408	33,,485	33,561
2500	33,636									

Таблица 8.25. Градуировочная таблица термо-ЭДС некоторых высокотемпературных термопар

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С; температура свободных концов термопар 0°С; нихросил: Ni, 14,2 % Cr, 1,4 % Si; нисил: Si, 4,4 % Si, 0,1% Mg

t, 'С	si If	1 | 2 l i	Ч-5		s o t Ie	g l	*i,* "С	i S i | S i	l i	is	*IS* S f f ^ j T l	i *t Ш*	*S* i l &
100	3,7	2,77			0,37	0,4	1100	40,6	40,08	2,73	6,83	5,85	
200	7,8	5,91					1200		43,84	3,00	7,38	6,39	
300	11,8	9,34		1,66	Ь33		1300		47,50	3,24	7,91	6,92	—0,285
400	15,1	12,97			1,89		1400		–	3,47	8,41	7,46	-f0,299
500	18,4	16,74			2,46		1500		–	3,68	8,89	JB,01	0,937
600	21,9	20,61	–	3,64	3,05		1600	–	–	3,87	9,35	8,58	1,63
700	25,5	24,53	–		3,63	–	1700	–	–	4,09	9,81	9,16	2,38
800	29,2	28,46	–		4,20		1800	–	–	4,19	10,26	9,75	3,14
900	33,0	32,37	–	–	4,76	–	2000	–	–	6,5*	–	11,00	
1000	36,7	36,25	2,45	6,24	5,31	–							

' Термо-ЭДС при температуре 2300° С.

8.6. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Действие конденсационных термометров основано на температурной зависимости давления насыщенных паров жидкости. Термометрические вещества — обычно жидкие газы: гелий, водород, неон, аргон, кислород и др. Для определения температуры по измеренному давлению пользуются таблицами или эмпирическими формулами. Диапазон измерения температуры конденсационными термометрами ограничен снизу температурой затвердевания термометрической жидкости, а сверху — температурой критической точки. Высокоточные термометры позволяют измерять температуру с погрешностью не больше 0,001 К.

Обычно давление паров определяют по показаниям ртутного манометра. При этом отсчеты давления по высоте столба ртути зависят от местного ускорения свободного падения и температуры ртути. В случае прецизионных измерений вводят поправки к барометрической высоте *h,* м:

гравитационная поправка

температурная поправка

$$Дг = — а Ш,$$

где g — значение местного ускорения свободного падения, м/с^; разность между температурой ртути и температурой, указанной в табл. 8.27—8.34, "С; а — коэффициент, который для ртутного манометра со стеклянной шкалой равен 1,72-10—' и для манометра с латунной шкалой 1,63-10-4 "С-' [47].

Вопросы термометрии по давлению паров жидкостей рассмотрены в [47, 61]. Важная для низкотемпературной термометрии методика измерения давления паров гелия обсуждается в [48, 62, 63].

Таблица 8.26. Рабочие интервалы некоторых конденсационных термометров

ТЖ		^He	е-Н,	«-Н,	Ne		Or	CFi
Т, К	0,2—3,316	0,5—5,195	13.81—23	13,96—30	24,56—40	63—84	54,4—94	90—173

а и и е. ТЖ—термометрическая жидкость: е - На - равновесный водород; п - Hj - нормальный водород (определегчаннях к табл. 8.1 и 8.4).

Таблица 8.27. Зависимость между давлением насыщенных паров ^He и температурой Г

Г. К	Приращение! температуры. К									
	0,00	0.01	0,02	0,03	ООЇ	0,05	0,06	0,07	0,08	0.09
					Давление, Па					
0,2	**0,00147**	**0,00298**	**0,00569**	**0,01030**	**0,017831**	**0,02964**	**0,04754**	**0,07385**	**0,11150**	**0,16406**
0,3	**0,2358**	**0,3320**	**0,4584**	**0,6220**	**0,8305**	**1,0928**	**1,4186**	**1,8187**	**2,3050**	**2,8902**
0,4	**3,588**	**4,414**	**5,383**	**6,512**	**7,820**	**9,324**	**11,045**	**13,002**	**15,217**	**17,712**
0,5	**20,510**	**23,633**	**27,106**	**30,955**	**35,203**	**39,877**	**45,003**	**50,608**	**56,718**	**63,363**
0, 6	**70,569**	**78,365**	**86,780**	**95,842**	**105,581**	**116,025**	**127,205**	**139,150**	**151,891**	**165,456**
0,7	**179,88**	**195,18**	**211,40**	**228,57**	**246,72**	**265,87**	**286,05**	**307,31**	**329,66**	**353,15**
0,8	**377,79**	**403,62**	**430,67**	**458,97**	**488,55**	**519,44**	**551,67**	**585,27**	**620,27**	**656,70**
0,9	**694,59**	**733,98**	**774,88**	**817,32**	**861,35**	**906,98**	**954,25**	**1003,19**	**1053,82**	**1106,17**
					Давление, 10^ Па					
1,0	**1,160**	**1,216**	**1,274**	**1,333**	**1,395**	**1,458**	**1,523**	**1,590**	**1,660**	**1,731**
1,1	**1,804**	**1,879**	**1,957**	**2,036**	**2,118**	**2,201**	**2,287**	**2,376**	**2,466**	**2,559**
1,2	**2,654**	**2,751**	**2,851**	**2,953**	**3,058**	**3,165**	**3,274**	**3,386**	**3,501**	**3,618**
1.3	**3,737**	**3,860**	**3,984**	**4,112**	**4,242**	**4,375**	**4,510**	**4,649**	**4,790**	**4,934**
1.4	**5,081**	**5,230**	**5,383**	**5,538**	**5,696**	**5,858**	**6,022**	**6,189**	**6,360**	**6,533**
1.5	**6,709**	**6,889**	**7,072**	**7,258**	**7,447**	**7,639**	**7,834**	**8,033**	**8,235**	**8,440**
1.6	**8,649**	**8,861**	**9,076**	**9,295**	**9,517**	**9,743**	**9,972**	**10,205**	**10,441**	**10,681**
1.7	**10,924**	**11,171**	**11,421**	**11,675**	**11,933**	**12,195**	**12,460**	**12,729**	**13,001**	**13,278**
1.8	**13,558**	**13,842**	**14,130**	**14,422**	**14,718**	**15,017**	**15,321**	**15,628**	**15,940**	**16,256**
1.9	**16,575**		**17,227**	**17,559**	**17,895**	**18,235**	**18,579**	**18,928**	**19,280**	**19,637**
2, 0	**19,999**	**20,'364**	**20,734**	**21,108**	**21,487**	**21,870**	**22,257**	**22,649**	**23,046**	**23,446**
2,1	**23,852**	**24,261**	**24,676**	**25,095**	**25,518**	**25,946**	**26,379**	**26,816**	**27,259**	**27,705**
2,2	**28,157**	**28,613**	**29,074**	**29,540**	**30,011**	**30,486**	**30,967**	**31,452**	**31,942**	**32,438**
2.3	**32,938**	**33,443**	**33,953**	**34,468**	**34,988**	**35,514**	**36,044**	**36,580**	**37,120**	**37,666**
2.4	**38,217**	**38,774**	**39,335**	**39,902**	**40,474**	**41,052**	**41,635**	**42,223**	**42,816**	**43,415**
2.5	**44,020**	**44,630**	**45,245**	**45,866**	**46,493**	**47,125**	**47,763**	**48,406**	**49,055**	**49,710**
2.6	**50,370**	**51,037**	**51,709**	**52,386**	**53,070**	**53,759**	**54,455**	**55,156**	**55,863**	**56,576**
2.7	**57,295**	**58,021**	**58,752**	**59 489**	**60,233**	**60,982**	**61,738**	**62,500**	**63,268**	**64,043**
2.8	**64,824**	**65,611**	**66,405**	**67 ,'205**	**68,011**	**68,824**	**69,644**	**70,470**	**71,302**	**72,141**
2,9	**72,987**	**73,840**	**74,699**	**75,565**	**76,438**	**77,318**	**78,205**	**79,098**	**79,999**	**80,907**
3.0	**81,821**	**82,743**	**83,672**	**84,608**	**85,551**	**86,502**	**87,460**	**88,425**	**89,398**	**90,378**
3.1	**91,366**	**92,361**	**93,364**	**94,375**	**95,393**	**96,419**	**97,453**	**98,495**	**99,544**	**100,602**
3.2	**101,67**	**102,74**	**103,82**	**104,91**	**106,01**	**107,12**	**108,23**	**109,36**	**110,49**	**111,63**
3.3	**112,78**	**113,94**								

Зависимость между давлением *р.* Па, насыщенных паров »Не и Г„. К, в области от 0,5 до 3,3162 К описывается уравнением

Это уравнение справедливо в области от 0,5 до 0,2 К при замене Г„ *Ti* fl_, = - 2,50943 **К;** а„ = 9.70876; Oj = 0,210429 К-2;' а, = - 0,0545145 К"': «4 = 0,0056067 ***КГ*-, *Ь*** = 2,25484. Oi = - 0,304433 **К"»}**

.28. Зависимость между давлением насыщенных паров ^Не и температурой

т, к	Приращение температуры. К									
	0.00	0.01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
					Давление, Па					
0,5	0,00206	0,00287	0,00396	0,00539	0,00726	0,00969	0,01280	0,01676	0,02176	0,0280J
0,6	0,0358	0,0454	0,0573	0,0716	0,0891	0,1101	0,1353	0,1653	0,2009	0.2429
0,7	0,2922	0,3500	0,4172	0,4952	0,5854	0,6892	0,8082	0,9444	1,0995	1,2757
0,8	1,475	**1,700**	1,954	2,239	2,558	2,914	3,310	3,751	4,240	4,782
0,9	5,379	**6,038**	6,762	7,556	8,427	9,379	10.418	11,550	12,781	14,119
1,0	15,570	17,140	18,839	20,672	22.649	24,777	27,066	29,523	32,159	34,983
1,1	38,005	41,234	44,682	48,359	52,276	56,445	60,877	65,585	70,580	75,875
1,2	81,483	87,418	93,693	100,322	107,318	114,698	122,474	130,663	139,279	148,339
1,3	157,86	167,85	178,34	189,33	200,85	212,92	225.54	238,74	252,54	266,96
1,4	282,00	297,70	314,07	331,13	348,90	367.40	386,65	406,67	427,48	449,10
1,5	471,54	494,84	519,02	544,08	570,06	596,98	624,85	653,71	683,56	**714,44**
1,6	746,36	779,35	813,43	848,62	884,95	922.43	961,08	1000,94	1042,02	**1084,35**
					Давление, 10^ Па					
1,7	1,128	1,173	1,219	1,267	1,315	1,366	1,417	1,470	1,525	1,581
1,8	1,638	1,697	1,758	1,820	1,884	1,949	2,016	2,084	2,154	2,226
1,9	2,299	2,374	2,451	2,530	2,610	2,692	2,776	2,862	2,949	3,038
2,0	3,129	3,222	3,317	3,413	3,512	3,612	3,714	3,818	3,924	4,031
2,1	4,141	4.252	4,365	4,480	4,597	4,715	4,836	4,958	5,082	5,207
2,2	5,335	5,465	5,597	5,731	5,867	6,006	6,146	6,289	6,434	6,581
2,3	6,730	6,882	7,036	7,192	7,351	7,512	7,676	7,842	8,010	8,181
2,4	8,354	8,530	8,708	8,889	9,072	9,258	9,447	9,638	9,832	10,029
2,5	10,228	10,430	10,634	10,842	11,052	11,265	11,481	11,699	11,921	12,145
2,6	12,372	12,602	12,835	13,071	13,310	13,552	13,797	14,045	14,296	14,550
2,7	14,807	15,067	15,330	15,597	15,867	16,139	16,415	16,695	16,977	17,263
2,8	17,552	17,844	18,140	18.438	18,741	19,046	19,355	19,668	19,984	20,303
2,9	20,625	20,952	21.281	21,615	21,951	22,292	22,635	22,983	23,334,	23,689
3,0	24,047	24.409	24,775	25,144	25,517	25,894	26,275	26,659	27,048^	27.440
3,1	27,835	28,235	28,639	29,046	29,458	29,873	30.293	30,716	31,143	31,575
3,2	32,010	32,449	32,893	33.340	33,792	34,248	34,708	35,172	35,640	36,113
3,3	36,590	37,071	37,556	38,046	38,540	39,038	39,541	40,047	40,559	41,075
3,4	41,595	42,119	42,648	43,182	43,720	44,262	44,810	45,361	45,917	46,478
3,5	47,044	47,614	48,189	48,768	49,352	49,941	50,534	51,133	51,736	52.344
3,6	52,956	53,574	54,196	54,823	55,455	56,092	56,734	57,381	58,033	58,689
3,7	59,351	60,018	60,690	61,367	62,048	62,735	63,427	64,125	64,827	65,535
3,8	66,247	66,965	67,688	68,417	69,150	69,889	70,634	71,383	72,138	72,898
3,9	73,664	74,435	75,211	75,993	76,780	77,573	78,371	79,175	79,984	80,799
4,0	81,620	82,446	83,277	84,115	84,958	85,806	86,661	87,521	88,387	89,258
4,1	90,136	91,019	91,908	92,803	93,704	94,610	95,523	96,442	97,366	98,297
4,2	99,233	100,176	101.125	102,080	103,040	104,008	104,981	105,960	106,946	107,938
4,3	108,94	109,94	110,95	111,97	112,99	114,02	115,06	116,10	117,15	118,21
4,4	119,27	120,34	121,41	122,50	123,58	124,68	125,78	126,89	128,01	129,13
4,5	130,26	131,39	132,54	133,69	134,84	136,01	137,18	138,36	139,54	140,73
4,6	141,93	143,14	144,35	145,57	146,80	148,03	149,27	150,52	151,78	153,04
4.7	154,31	155,59	156,88	158,17	159.47	160,78	162,09	163,41	164,75	166,08
4,8	167,43	168,78	170,14	171,51	172,89	174,27	175,67	177,07	178,47	179,89
4,9	181,31	182,74	184,18	185,63	187,09	188,55	190,03	191,51	193,00	194,50
5,0	196,00	197,52	199,04	200,58	202,12	203,67	205,24	206,81	208,39	209,98
5,1	211,58	213,20	214,82	216,45	218,10	219,76	221,43	223,12	224,82	226,54

где a- = -7,41816; a„ = 5,42128; ai =9,903203 K"»: Oj = -9,617095 K"»; fij = 6,804602 K--": c, =.-3,0154606 K"^; 05=0,7461357 K"»; o, = — 0,0791791 *Kf^.*

В области от 2,1768 К До критической температуры Tj^p = 5,1953 К

$$P = \% ('\cdot"/^{кр})^{\wedge} + " (1 - \quad ,$$

где = -30,93285; a_0 = 392,47361; c. = 2328,04587; «, = 8111.30347; я, = - 17809,80901; 04=25766,52747; = c, = 14944.65142; o, = -5240,36518; «e = 807,93168; &= 14,53333.

Таблица 8.29. Зависимость между давлением насыщенных паров, равновесиого водорода (10» Па) *кГ^й**

	Приращение температуры, К				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
14,0	7,842	8,773	9,787	10,888	12,082
15,0	13,373	**14,765**	16,266	17,879	19,609
16,0	21,463	**23,446**	25,562	27,818	30,220
17,0	32,772	35,481	38,352	41,392	44,606
18,0	48,000	51,580	55,351	59,321	63,495
19,0	67,879	72,480	77,303	82,355	87,641
20,0	93,169	98,945	104,974	111,263	117,819
21,0	124,65	131,75	139,15	146,83	154,82
22,0	163,11	171,71	180,62	189,87	199,44
23,0	209,35	–	–		

• Уравнение, ...ющее эту зависимость.

Таблица 8.30. Зависимость между давлением

Т. к	Приращение температуры, К				
	0,0	0,2	0,4	0.6	0,8
14,0	7,384	8,271	9,238	10,289	11,430
15,0	12,665	13,999	15,437	16,984	18,646
16,0	20,428	22,335	24,373	26.546	**28,862**
17,0	31,325	33,940	36,715	39,654	**42,763**
18,0	46,049	49,517	53,173	57,023	61,073
19,0	65,330	69,798	74,486	79,397	84,540
20,0	89,920	95,543	101,415	107,543	113,934
21,0	120,59	127,53	134,74	142,24	150,04
22,0	158,14	166,54	175,26	184,29	193,66
23,0	203,35	213,39	223,17	234,50	245,59
24,0	257,05	268,88	281,09	293,68	306,67
25,0	320,05	333,84	348,05	362,67	377,72
26,0	393,20	409,12	425,49	442,31	459,59
27,0	477,33	495,55	514,25	533,44	553,13
28,0	**573,31**	594,01	615,22	636,96	659,22
29,0	**682,02**	705,37	729,27	753,72	778,75
30,0	804,35		–	–	–

Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.31. Зависимость между давлением насыщенных паров неона (Ю^ Па) и Т^s*

т, к	Приращение температуры, К				
	0,0	0,2	0,4	0.6	
24,0				44,022	47,356
25,0	50,882	54,605	58,534	62,676	67,037
26,0	71,626	76,449	81,515	86,831	92,404
27,0	98,243	104,355	110,747	117,429	124,408
28,0	131,69	139,29	147,21	155,45	164,04
29,0	172,97	182,25	191,89	201,91	212,31
30,0	223,09	234,27	245,85	257,84	270,26
31,0	283,11	296,40	310,13	324,32	338,98
32,0	354,11	369,72	385,82	402,43	419,54
33,0	437,18	455,34	474,05	493 ,30	513,10
34,0	533,47	554,42	575,95	598,08	620,82
35,0	644,16	668,14	692,75	718,00	743,91
36,0	770,48	797,74	825,67	854,31	883,66
37,0	913,73	944,52	976,07	1008,36	1041,42
38,0	1075,26	1109,89	1145,33	1181,57	1218,65
39,0	1256,56	1295,33	1334,96	1375,47	1416,88
40,0	1459,19	–		—	–

Уравнение, описывающее эту зав ...сть, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.32, Зависимость между давлениии насыщенных паров азота и Т^s*

т. к	Приращение температуры, К				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
			Давление, Па		
45,0	66,408	71,987	77,979	84,411	91,310
46,0	98,705	106,627	115,109	124,183	133,887
47,0	144,26	155,33	167,15	179,76	193,20
48,0	207,52	222,77	239,00	256,27	274,62
49,0	294,13	314,84	336,83	360,16	384,89
50,0	411,11	438,88	468,29	499,40	532,32
51,0	567,12	603,90	642,75	683,77	727,05
52,0	772,72	820,87	871,61	925,07	981,37
			Давление, 10^ Па		
53,0	1,041	1,103	1,169	1,237	
54,0	1,386	1,466	1,550	1,638	
55,0	1,827	1,928	2,035	2,146	
56,0	2,385	2,512	2,646	2,785	
57,0	3,083	3,243	3,409	3,582	
58,0	3,952	4,149	4,354	4,568	
59,0	5,022	5,264	5,515	5,777	
60,0	6,332	6,627	6,932	7,250	
61,0	7,923	8,279	8,649	9,032	
62,0	9,843	10,270	10,714	11,173	
63,0	12,143	12,651	13,123	13,609	
64,0	14,624	15,154	15,699	**16,260**	
65,0	17,431	18,041	18,668	19,312	
66,0	20,655	21,353	22,070	22,807	
67,0	24,338	25,134	25,950	26,787	
68,0	28,526	29,428	30,353	31,300	
	33,265	34,284	35,326	36,394	
7О!О	38,605	39,750	40,921	42,118	
71,0	44,596	45,877	47,187	48,525	
72,0	51,291	52,719	54,178	55,669	
73,0	58,744	60,331	61,950	63,603	
74,0	67,012	68,768	70,559	72,386	
75,0	76,150	78,088	**80,063**	82,076	
76,0	86,220	88,351	**90,522**	92,733	
77,0	97,280	99,616	101,995	104,417	
78,0	109,39	111,95	114,55	117,19	
79,0	122,62	125,41	128,24	131,12	
80,0	137,03	140,06	143,14	146,27	
81,0	152,68	155,97	159,31		
82,0	169,65	173,20	176,82	180 ,'48	
83,0	187,99	191,83	195,73		
84,0	207,78				

* Уравиение, описывающее эту зависимость в области от 63,146 до 84 К, см. в табл. 8.4. В области от 45 до 63 К Давление *р.* Па, связано с температурой Г,», К. усавненнем [65]

Ш р = 22.426208 - 820,3673/ Гкв.

Таблица 8.33. Зависимость между давлением насыщенных паров кислорода и Tgg*

т. к	Приращеntie температуры, К				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1.6
		Давление, Па			
54.0		148,	168,15	190,19	214,72
56.0	241,95	272,13	305,53	342,42	383,11
58.0	427,91	477,16	531,23	590,48	655,34
	726,21	803,56	887,85	979.59	1079,30
		Давление, 1(Р Па			
62,0	1,188	1,305	1,432	1,569	1,718
64,0	1,878	2,051	2,236	2,436	2,651
66,0	2,881	3,128	3,392	3,675	3,977
€8,0	4,300	4,644	5,011	5,402	5,818
70,0	6,259	6,729	7,226	7,754	8,314
72,0	8,906	9,532	10,194	10,893	11,631
74,0	12,409	13,229	14,093	15,002	15,958
76,0	16,964	18,019	19,127	20,290	21,509
78,0	22,786	24,124	**25,524**	26,988	28,518
«0,0	30,118	31,788	**33,531**	35,350	37.246
82,0	39,222	41.280	43,422	45,652	47,971
«4,0	50,382	52,888	55,490	58,192	60.996
«6,0	63,904	66,921	70,047	73,286	76,640
88,0	80.113	83,706	87,424	91,268	95,242
90,0	99,348	103,590	107,970	112,491	117,157
92,0	121,97	126,93	132,05	137,32	142,75
94,0	148,35				–

* Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.

Таблица 8.34. Зависимость между давлением насыщенных паров CF4 (фреон-74) и T^s

Г. к	Приращение температуры, К				
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
		Давление, Па			
90,0	119,70	147,49	180,76	220.41	267,46
95,0	323,01	388,31	464,77	553,90	657,42
100,0	777,18	915,22	1073,77	1255,24	1462,26
		Давление, 1СР Па			
105,0	1,698	1,965	2,266	2,606	2,988
110.0	**3,416**	**3,895**	4,428	5,021	5,680
115,0	**6,408**	**7.213**	8,099	9,074	10,144
120,0	11,316	12,597	13,995	15,517	17,171
125,0	18,967	20,912	23.017	25,289	27,740
130,0	30,378	33,215	36,261	39,527	**43,024**
135,0	46,763	50,757	55,017	59,556	**64,386**
140,0	69.520	74,972	80,755	86,882	93,368
145,0	100,23	107,47	115,12	123,18	131,68
150,0	140,62	150,03	159,91	170,29	181,18
155,0	192,59	204,55	217,07	**230,16**	243,85
160,0	258,15	273,08	288,65	**304,89**	321.81
165,0	339.43	357,77	376,84	396,67	417,28
170,0	438,67	460,88	483.91	507,80	

В облаете от 89,6 до 173 К давление р. Па, связано i; темпера.. нурой Гб8, К, уравнением [64]

$$\{P'Pkv) = \quad + \quad + \quad + \quad ,$$

где г = 1 — Г^ ; = ^«s/^^up; Ркр — критическое равное 3742 • Ш* Па; Tjjp —критическая температура, равная Л = -2,584$\sqrt{5}$1Т 6,7651056; Л = 1,0777437; Л = — 1,74909/1;

8.7. ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЯ

Измерение температуры тел пирометрами основано на использовании законов излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Поскольку характер излучения реальных тел отличается от характера излучения АЧТ, то измеренная температура тела будет отличаться от действительной. Различают яркостную (спектральную), цветовую (спектрального отношения) и радиационную температуры.

Вопросы оптической пирометрии рассмотрены в [66—69],

Яркостная (спектральная) пирометрия основана на измерении интенсивности (яркости) излучения тел при фиксированной длине волны. Если для длины волны Я интенсивность излучения тела и интенсивность излучения АЧТ равны, то температура АЧТ будет равна ***яркостной температуре Тп*** излучающего тела. С термодинамической температурой Тп связана соотношением

(8. 10)

где Сг — вторая постоянная закона Планка, равная 0,014388 м-К; е(Я., ***Т)*** —спектральный коэффициент теплового излучения тела на длине волны м, при температуре Г, К.

Формула (8.10) выведена в приближении закона Вина. При точных измерениях необходимо учитывать, что (8.10) дает заниженные значения 7" при температуре выше 3000 К.

Цветовая пирометрия (пирометрия спектрального отношения) основана на сравнении отношений интенсивности излучения для двух длин волн и Я2 для нечерного тела и АЧТ. Если эти отношения равны, то ***цветовая температура*** Гц равна температуре АЧТ. С термодинамической температурой Гц связана соотношением

$$\frac{1}{T} \quad \text{Гц} + c, \text{Ux} \quad K) \quad - \qquad (8.11)$$

Цветовая температура так называемых серых тел, характеризующихся условием е(Ль 7')=е(А2, ***Т),*** совпадает с термодинамической. Метод спектрального отношения нечувствителен к серой среде (пропускательная способность которой удовлетворяет условию т(?ц) = =т(Я2)),часто присутствующей между объектом и пирометром (например, пыль, дым, смотровые окна и т. д.).

Радиационная пирометрия основана на измерении полной (во всем спектральном интервале) энергии излучения тел. Если энергия полного излучения нечериого тела и энергия АЧТ равны, то температура АЧТ определяет ***радиационную температуру Тр*** нечерного тела. Радиационная температура связана с термодинамической соотношением

$$\Gamma = \Gamma p[\text{г}, (\Gamma)\Gamma \qquad (8.12)$$

где ***et(T)*** — интегральный коэффициент теплового излучения тела Применение радиационных пирометров наиболее эффективно при низкой температуре, когда спектральная излучательная способность тел мала.

Излучательная (и отражательная) способность металлов и сплавов сильно зависит от состояния поверхности (шероховатости, наличия оксидных пленок и т. д.). В табл. 8.35—8.37 приведены данные, относящиеся к чистой полированной поверхности. В табл. 8.38 даны значения интегрального коэффициента теплового излучения некоторых оксидов.

Оптические методы и средства измерения температур описаны в [24, 25, 70—75].

Таблица 8.35. Значения спектрального коэффициента теплового излучения e^ веществ для X : 0,65 мкм [76-78]

Вещество, (плотность, р/р^сор)	Т. К	
	1000-2000	0,419-0 370
	1200—2600	0,453-0 418
	1500—1800	0.445-0 453
Германий	1000—2000	0,50—0 53
Графит искусственный	1200—3200	0,90-0 83
Двуоксид тория оплавленный (0,96) [85]	1500-3440	0,863-0 876*2
Двуоксид урааа оплавленный (0,96) [85]	300—3120	0,824—0 836*2
Двуоксид циркония	1155—1800	0,40—0 55*3
Железо	1130—1430	0,38-0 35*3
Иридий	1300—2500	0,272—0 215
Карбид гафния	1300—2900	0,73-0 60
Карбид ниобия	1300—3400	**0,66-0** 49
Карбид тантала оплавленный (0,95) [85]	300—3000	0,514
Карбид урана оплавленный (0,965) [85]	300—1400—2780	0,615—0,556-0,539*2
Кобальт	1180—1530	0,39-0 37*3
Кремний	1000—1700	0,64—0 46
Молибден	1100—2800	0,409—0 ,352
Никель	1080—1500	0,36-0 ,32
Никель окисленный	1100—1500	0.86-0 ,82
Ниобий	1000-2600	0,368—0 *,348*
Оксид магния	1000—1800	0,15—0 *,43*
Осмий	1200-1800—2500	0,55-0 ,38—0.39
Палладий	1000—1700	0,400-0 ,306
Платина	1100—2000	0,292-0 ,300
Платина холоднокатаная	1100—1500	0.32-0 ,42
Рений	1000—2900	0,432-0 ,370
Родий	1100—2100	0,269-0 ,196
Тантал	1200—2400	0,445-0 ,414
Тантал старый	1100—1600—2800	0,49—0 ,44-0,41
Титан	1000—1900	0,503-0 ,444
Хром	1733	0,39
Цирконий	1000—2100	0,450-0 ,403

Спектральная излучательиая способиосчь соответствует указанным температурам. Линейная интерполяция между точками доо-таточно точная.
X = 0,665 мкм.
X = 0.63 мкм.

Таблица 8. 36 Значения спектрального коэффициента теплового излучеин веществ при разных длинах волн [76]

Вещество	Г. К	Тип*'	Длина волиьJ, мкм											
			0.3	0.4	0,5	0,6	0,7	0.8	0.9	1	2,0	3.0	4,0	5,0
Алюминий	293	п	0,081	0,083	0,089	0,098	0,111	0,140	0,111	0,068	0,030	0,026	0,024	0,023
Вольфрам*^	293 [78]	h	—	–	—	–	–	–	–	–	0,070	0,059	0,051	0,046
	1200	п	0 486	0,482	0,474	0,461	0,446	0,428	0,408	0,386	0,186	0,112	0,086	0,078
	2600	п	o',465	0,461	0,447	0,426	0,411	0,394	0,376	0,360	0,248	0,191	0,163	0,146
Й5Г	293 [78]	h		0,97	0.960	0,950	0,925	0,90	0,89	0,87	0,72	0,600	0,500	
	293 [78]	h			0,440	0,430	0,420	0,39	0,37	0,36	0,22	0,160	0,110	0,080
Золото	293	п	0,64	0,63	0,540	0,130	0,040	0,03	0,02	0,02	0,02	0,017	0,014	0,012
Медь	293	п	0,67	0,50	0,400	0,200	0,030	0,02	0,02	0,02	0,018	0,016	0,014	0,012
Молнбден*2	293 [78]	п	–	0,480	0,475	0,463	0,461	0,459	0,420	0,405	0,125	0,082	0,073	0,060
	1000	п		0,458	0,438	0,417	0,394	0,367	0,333	0,302	0,106	0,063	0,046	0,035
	1400	п	–	0,440	0,422	0,403	0,383	0,361	0,333	0,310	0,151	0,096	0,073	0,059
	2000	п	–	0,419	0,403	0,387	0,370	0,352	0,333	0,317	0,191	0,133	0,102	0,084
Палладий	295	п	0,60	0,48	0,42	0,36	0,33	0,31	0,29	0,27	0,17	0,14	0,11	0,08
Серебро	293 [78]	h	–	–	0,08	0,06	0,05	0,045	0,04	0,03	0,025	0,02	0,02	0,02
Сталь углеро-дистая	293	п	0,50	0,45	0,42	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,22	0,16	0,12	0,10
Тантал*2	293 [78]	п	—	—	0,56*«	0,493*®	—	—	—	0,210	0,110	0,080	0,070	0,065
	1200	п		0.525	0,51	0,473	0,421	0,363	0,304	0,262	0,148	0,123	0,108	
	2400	п	_	0,498	0.46	0,432	0,399	0,366	0,338	0,317	0,220	0,190	0,168	_

спектрального коэффициента теплового излучения в направлении нормали; h — то же в пределах полусферы.
В высокотемпературной области при фиксированной длине волны линейная интерполяция между указанными температурами дос-таточно точная.
Графит пористый искусственный.
« X = 0,467 мкм.
X = 0,665 мкм.

Таблица 8.37. Значения интегрального коэффициента теплового излучения некоторых веществ [76—78]

	T, К	Тип*	
Алюминий:			
сильно окисленный	50—800	h	0,008—0,062
электролитически	360—800	h	0,20-0,33
окисленный, 4—10 мкм	310	h	0,72—0,83
Бериллий	1100—1300—1480	n	0,41—0,57—0,87
Бронза:			
алюминиевая	450—1270	n	0,03—0,06
окисленная	450—1270	n	0,08—0.16
Ванадий	1000—1300—2000	h	0.145—0,190—0,257
Вода:	273-373	n	0,92—0,96
лед гладкий	273	n	0,96
лед, покрытый инеем	273	n	0,985
Вольфрам	400-800-2000-3400	h	0,039-0,081-0,249—0,345
	1200-1800-2200—3000	n	0,116—0,201—0,247—0,312
	1200-2000	h	0,284-0.324
	1200—3200	h	0,77—0,83
Дюраль Д 16	500—900	n	0,016—0,03
Железо	160—1100	h	0,081—0,254
	600—1100	n	0,20—0,56
Золото	50—1150	h	0,014—0.063
Иридий	1300-2500	h	0,12—0,21
	295	n	0,04
Кадмий	80-300	h	0,03
Кобальт	1100—1500	h	0,21
Латунь:	373	n	0,06
отлично полированная	500—610	h	0,02
окисленная	450—590	n	0,56—0,64
Магний	410—490	h	0,12
Манганин прокатанный	391	П	0,048
	50—300—800—1100	h	0,022—0,024-0,05-0,061
	80—380-1160	n	0,02—0,01—0,02
окисленная	300-600—800—1100	h	0,38—0,47—0,59—0,87
окисленная	80—540—700—1078	n	0,66-0,78-0,90-0,93
Молибден	1100—2100—2400—2800	h	0,105-0,225—0,254—0,282
	293	n	0,009
	1100—2800	n	0,096—0,275
Никель	300—1500	h	0,068—0,196
	500-1400	n	0,061—0,182
	420-700—980	n	0,07—0,39—0,47
Ниобий	1000—1700-2400	h	0,116—0,187—0.244
	1000—1800—2600	n	0,085-0,170-0,232
Нихром:			
прокатанный	800—950—1100	n	0,20—0,24—0,36
окисленный	480—900- 1200	h	0,62—0,67—0,78
Оксид железа FegOa	310—1350	h	0,82—0.89
Олово	310—360	h	0,05
Палладий	1000—1300—1600	h	0.10—0,15—0,18
	400-1520	n	0,02—0,17
Платина	300-1000—1400—1900	h	0,041—0,128-0,167—0,200
	400-800—1600—2000	n	0,029—0,080—0,162—0,184
Рений	1000-1400-1900-	h	0,164—0,201—0,255—
	2300—2600—2900	h	0,290—0,309—0,322
Родий	900—1200—1600—	h	0,068—0,112—0.150—
	1900-2200	h	0,169—0,183
	900—1600	П	0,053—0,100
Ртуть чистая	273—373	n	0,09—0,12
Свинец:	310—530	h	0,04—0,08
серый окисленный	270-470	h	0,28
окисленный при 473 К	473	h	0,63
Серебро	100—1100	h	0,012—0,046
	80—300	n	0,020—0,075

Продолжение табл. **9.10**

Вещество	*Т*, К	Тип*1	
Сталь:			
углеродистая	100-1400	h	0,06—0,31
» окисленная	573—1073	h	0,86—0,91
07Х16Н6	250—900	n	0,13—0,28
» окисленная при 1173 К	300—1000	n	0,84
12Х18Н10Т	180—700—1200	n	0,13—0,24—0.38
08Х18Н12Б	100—1000—1390	n	0,17—0,25—0,65
Стекло	293	n	0,94
Сурьма	300—350	n	0,28—0,31
Тантал	1000—2300—2700—3300	h	0.132-0,251-0,282—0,316
»	80—300	n	0,020—0,076
»	1300—1600—2000	n	0.132—0,170—0,260
» нитрид	800—1500—2600	n	0,74-0,80-0,60
Теллур	295	n	0,22
Титан:	900—1400—1900	h	0,217-0,274—0,323
электрополированный	250—370	h	0,10—0,13
карбид	1200-3000	h	0,60—0,75
Уран	1200	h	0,35
» карбид	1600—2000	h	0,42
Хром	270-600-750—1220	n	0,06—0.06—0,10—042
»	80	h	0,07
Цинк	300—530	n	0,02—0,06
» окисленный	300—470—800	n	0,28—0,14—0,11
Цирконий	1100-1600—2100	h	0,204-0,248-0,278
Карбид	1400—2900	h	0,40—0,55
Диборид	1200—2500	h	0,53—0,75

n — значения штегрального коэффициента теплового излучения в направлении нормали; ft — то же в пределах полусферы.
Значения интегрального коэффициента теплового излучения соответствуют указанным температурам. Линейная интерполяция между точками достаточно точная.

Значения интегрального коэффициента теплового излучения некоторых оксидов [76]

Вещество	Температура, К												
	20	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
MgO	0.73	0,69	0,57	0,52	0,42	0,35	0,30	0,28	0,29	0,35	0,49		
ZrO,	0,81	0,75	0,65	0,53	0,42	0,37	0,37	0,39	0.46	0,55	0,62	0,66	0,69
ThO,	—		0,61	0,52	0,43	0,38	0,37	0,40	0,49	0,61	0,68	0,71	
A1,Oз	—	0,79	0,71	0,60	0,52	0,46	0,42	0,40	0,39		—	—	

8.8. ТЕРМОИНДИКАТОРЫ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Термоиндикаторы (ТИН) — вещества (смеси веществ), изменяющие свой внешний вид (цвет, яркость свечения, форму) при определенной температуре — критической температуре ТИН <нр и используемые для регистрации этой температуры.

ТИН подразделяют на две группы: обратимые — ТИН, исходный внешний вид (цвет или яркость свечения) которых восстанавливается после восстановления исходной температуры; необратимые — ТИН, необратимо изменяющие свой внешний вид (цвет или форму) при воздействии критической температуры. Различают пять типов ТИН: термохимический индикатор, кристаллоструктурный, люминесцентный, жидкокристаллический ТИН и ТИН плавления. ТИН применяют в виде термопорошков, термокрасок, термолаков, термопаст, термокарандашей и термотаблеток. Измерение температур термоиндикаторами описано в [79—81].

Измерители максимальной температуры кристаллические (ИМТК) — датчики максимальной температуры, рабочее вещество которых (обычно облученные нейтронами алмаз или карбид кремния) изменяет параметр кристаллической решетки в зависимости от температуры и времени выдержки. Максимальную температуру определяют с помощью градуировочного графика по изменению параметра решетки с учетом времени выдержки (длительность отжига) [82]. ИМТК используют для измерения температур в диапазоне 150—1200 °С с временами выдержки от $10^{\wedge}$ до 10^{8} с. Погрешность измерений составляет ±6 °С на стационарных режимах и ±12 °С на нестационарных. ИМТК имеют малые размеры: стандартный — диаметр 1 и длина 5 мм; микроизмеритель — 0,3Х0,3Х0,3 мм.

Не обладая большой точностью, методы термоиндикаторов и измерителей максимальной температуры иногда полезны, а в ряде случаев и • труднозаменимы (при исследовании тепловых полей, в аэродинамических измерениях, при измерении температур токонесущих элементов, деталей машин и механизмов и т. п.).

Таблиц! Классификация термоиндикаторов [81]

				Относитель- "^"ocZT'	Количество цветовых переходов	Зависимость от условий нагрева
Термохимические	Порошок, краска, паста, лак, карандаш, таблетка, печатная краска	Обратимые, необратимые, квазиобратимые		2,5—10	Один или несколько	Зависимые
Термсиндикаторы плавления	Порошок, краска, паста, лак, карандаш, таблетка, печатная краска	Необратимые, обратимые	35-4^1150	0,5-2,5		Независимые
Жидкокристаллические	Порошок, краска	Обрати! »	-20^4-250	0,1-2	Неограниченное количество	Зависимые
Люминесцентные	Порошок, краска, паста, лак, карандаш, таблетка, печатная краска		-200--Ч-10С	0,5—2	Один ИЛ1 несколько	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comptes Rendus des Seances de la Treizieme Conference Generale des Poids et Mesures (1967—1968); Resolutions 3 and 4, P. 104.
2. Кричевский И. Р. Понятия и основы термодинамики,-2-е изд. М.: Химия, 1970.
3. Wolfe H. G. The Temperature concept; Temperature, its measurements and control in scienc and industry. Ed by Hugh C. Wolfe. N. Y.; Beinhold, 1955. Vol. 2. Ch. **I.** P. 3-8.
4. de Boer J.//Metrologia. 1965. Vol. 1. P. 158—169.
5. Quinn T. J., Compton J. P.//Rep. Prog. Phys. 1975. Vol. 38. P. 151—239.
6. Попов М. IV. Термометрия и калориметрия.— 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1954.
7. Гордов А. Н. Температурные шкалы. М.: Изд-во стандартов, 1966.
8. Hudson R. P.//Rev. Sci. Instrum. 1980. Vol. 51. P. 871-881.
9. Hall J. A.//J. Sci. Instrum. 1966. Vol. 43. P. 511—547.
10. Куинн Т. Температура: Пер. с англ./Под ред. Д. Н. Астрова. М: Мир, 1985.
11. Орлова М. П. Низкотемпературная термометрия. М.. Изд-во стандартов, 1975.
12. Temperature, its measurement and control in science and industry. Vol. 1. N. Y.: Reinhold, 1941; Vol. 2 N. Y.: Reinhold, 1955; Vol. 3. N. Y.: Reinhold, 1962; Vol.4. Pittsburgh: Instrument Society of America, 1972; Vol. 5. N. Y.: American Institute of Physics. 1982.
13. The International Practical Temperature Scale of 1968//Metrologia. 1969. Vol. 5. P. 35—44.
14. Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ—68). М.: Изд-во стандартов, 1971.
15. Preston-Thomas H.//Metrologia. 1976. 12. P. 7—

16. Crovini L., Bedford R. E., Moser A.//Metrologia. 1977. Vol. 13. P. 197—206.
17 Bedford R. E., Crovini L., Maas H., Skakala J.// Comite Consultatif de Thermometrie, I38® Session, Annexe T3. 1980. P. T55—T79.
18. Bedford R. E., Bonnier G., Maas H., Pavese F.// Comite Consultatif de Thermometrie, I4® Session, Appendix T3, 1982. P. T124—T132.
19. The **1976** Provisional 0, 5 K to 30 K temperature Scale//Metrologia. 1979. Vol. 15. P. 65—68.
20. Brickwedde F. G., Van Dijk H., Durleux M., Clement J. R., Logan J. K.//J. Res. NBS. 1960. Vol. 64A P. 1—18.
21. Sherman R. H., Sydorlak S. G., Roberts T. R.// J. Res. NBS. 1964. Vol. 68A. P. 547—588.
22. Кытин Г. А., Астров Д. Н.//Измерительная техника. 1983. №. 4. С. 62—63.
23. Comite Consultatif de Thermometrie. 14 Session. 1982. Recommendation Tl. P. T85—T86.
24. Геращенко О. А., Гордов А. Н., Лах В И. и др. Температурные измерения: Справочник. Киев: Наукова думка, 1984.
25. Сосновский А. Г., Столярова Н. И. Измерение температур. М.: Изд-во стандартов, 1970.
26. Линевег Ф. Измерение температур в технике: Справочник/Пер. с нем./Под ред. Л. А. Чарихова. М.: Металлургия, 1980.
27. Геращенко О. А., Федоров В. Г. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство. Киев: Наукова думка, 1965.
28. Wise J. A. Liquid-in-glass thermometry//NBS Monograph. 1976. Vol. 150.
29. Thompson R. D.//ISA Trans. 1968. Vol. 7. P. 87—92.
30. Ween S.//ISA Trans. 1968. Vol. 7. P. 93—100
31. Стрелков П. Г., Боровик-Романов А. С., Орлова М. П.//Журн. физ. хим. 1954. Т. 28. № 2. С. 345—352.
32. Бродский А. Д. Новые методы измерения низких температур. М.—Л.: Изд-во стандартов, 1962.
33. Датчики для измерения температуры в промышленности/Г. В. Самсонов, А И. Кич, О. А. Кюздени и др. Киев: Наукова думка, 1972.
34. Бочковский Р. В. Контактные датчики температуры. М.: Металлургия, 1978.
35. Вешек Я. Измерение низких температур электрическими методами: Пер. с чеш./Под ред. М. П. Орловой. М.: Энергия, 1980.
36. Riddle J. L., Furukawa G. T., Plumb H. H.//Platinum Resistance Thermometry. 1973. Vol. 126.

37. Johnston J. S.7^emperature Measurement 1975. Conference Series N 26. Lond,: Institute of Physics. 1975. P. 80—90.
38. Anderson R. L., Kollie T. G.//Critical Rev. in Analyt. Chem. 1975. Vol. 6. P. 171-221.
39. Dauphlnee T. M., Preston-Thomas H.//Rev. Sci. Instrum. 1954. Vol. 25. P. 884—886.
40. Орлова М. П., Астров Д. Н., Медведева Л. А.// Приборы и техника эксперимента. 1964. № 1. С. 230—232.
41 Кытин Г. А., Астров Д. Н., Зорин Р. В. Усовершенствование конструкции и исследование воспроизводимости показаний термометров сопротивления//Тр. ВНИИФТРИ. 1973. Вып. 4(34). С. 83—92.
42. Зарубин Л. И., Немиш И. Ю. Характеристики термометров сопротивления для криогенных температур// Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Киев: Наукова думка. 1974. Вып. 17. С. 77—79.
43 Rubin L. G., Brandt B. L., Sample H. H.//Cryogenics. 1982. Vol. 22. P. 491—503.
44. Варфоломеев С. Ф., Пекальи Л. А., Альшин Б. И. и др.//Приборы и техника эксперимента. 1977, № 1. С. 262—264.
45. Логвиненко С. П., Бевза Ю. Г.//Измерительная техника. 1967. № I. С. 42—44.
46. Логвиненко С. П., Алуф Г. Д., Зароченцева Т. М. Использование диодов для измерения низких температур//Тр.ФТИНТ. 1972. Вып. 2. С. 72—74,
47. White G. K. Experimental Techniques in Low-Temperature Physics. 3-d ed. Oxford: Clarendon Press. 1979
48. Астров Д. Н., Белянский Л. Б. Измерение низких температур (обзор)//Физика низких температур. 1967. Т. 2. № 7. С. 821—848.
49. Burns O. W., Hurst W. S.//^emperature Measurement 1975. Conference Series N 26, Lond.: Institute of Physics. 1975. P. 144—161.
50. Данишевский С. К., Сведе-Швец Н. И. Высокотемпературные термопары. М.: Металлургия, 1977.
51. Самсонов Г. В., Кислый П. С. Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники. Киев: Наукова думка, 1965.
52. Guildner L. A., Burns G. W.//High Temp.-High Press. 1979. Vol. 11. P. 173—192.
53. Bedford R. E.//High Temp.-High Press. 1972. Vol. 4. P. 241—260.
54. Kinzie P. A.//Thermocouple Temperature Measurement. N. Y.: John Wiley. 1973.
55. Медведева Л. А., Орлова М. П., Алексахин И. А., Духовлинова Н. Д. Измерение низких температур термопарами на основе сплава золота с кобальтом//Тр. ВНИИФТРИ. 1973. Вып. 4(34). С. 154—180.
56. Медведева Л. А., Орлова М. П., Рабинькин А. Г. Измерение низких температур термопарами на основе сплава золота с жел€30м//Тр. ВНИИФТРИ. 1973. Вып. 4(34). С. 181—192.
57. Бейлии В. М., Лапп Г. Б., Павлов Б. П. и др.// Измерительная техника. 1975. № 6. С. 35—36.
58. ГОСТ 3044—77. Преобразователи термоэлектрические. Градуировочные таблицы
59. Методы измерения температур: Сб. статей./Под ред. В. А. Соколова. М.: Изд-во иностр. лит., 1954,
60. Рогельберг И. Л., Бейлии В. М. Сплавы для термопар: Справочник. М.: Металлургия, 1983.
61. Hudson R. P.//Experimental Cryophysics. Lond.: Butterworths. 1961. Ch "
62. Cataland G.,/ Edlow M. H., Plumb H. H. Recent experiments on liquid helium vapor pressure measurements from 2 to 4 K: Temperature, its measurement and control in science and industry. N. Y.: Reinhold. 1962. Vol. 3(1). P. 413.
63. Sydorlak S. G., Rogerst T. R., Sherman R. H.// J. Res. NBS. 1964. Vol. 68A. P. 547—559.
64. Lobo L. Q., Staveley L. A. K.//Cryogenics. 1979. Vol. 19. P. 335—338.
65. Frels W., Smith D. R., Ashworth T.//Cryogenics. 1974. Vol. 14. P. 3—7.
66. Рибо **r.** Оптическая пирометрия. М.—Л.: Гостехтеориздат, 1934.
67. Гаррисон Т. Р. Радиационная пирометрия. М.: Мир. 1964
68. Гордов А. Н. Основы пирометрии. — 2-е изд. М.: Металлургия, 1971.
69. Киренков И. И. Метрологические основы оптической пирометрии. М.: Изд-во стандартов, 1976.
70. Оптические методы измерения температур в металлургии. Теория, системы, элементы: Сб. статей/Под ред. Д. Я. Света. М.: Наука, 1979
71. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982,
72. Поскачей А. А., Чубарое Е. П. Оптикоэлектронные системы измерения температуры. М.: Энергия, 1979.
73. Поскачей А. А., Чарихов Л. А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. М.: Металлургия, 1978.
74. Чернин С. М., Коган А. В. Измерение температуры малых тел пирометрами излучения. М.: Энергия, 1980.
75. Методы и средства оптической пирометрии. М.: Наука,, 1983.
76. Излучательные свойства твердых материалов: Справочиик/Под ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974.
77. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.; Машиностроение, 1980.
78. Kaspar J. Radiometry//American Institute of Physics Handbook. 3-d ed. N.Y,: McGraw-Hill Company. 1972.
79. Абрамович Б. Г. Термоиндикаторы и их применение. М.: Энергия, 1972.
80. Абрамович Б. Г.. Картавцев В. Ф. Цветовые индикаторы температуры. М.: Энергия, 1978.
81. Абрамович Б. Г., Матвеев В. В. Метод измерения температуры термоиндикаторами//Методы и средства оптической пирометрии. М.: Наука, 1983.
82. Николаенко В. А., Карпухин В. И. Измерение температуры с помощью облученных материалов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
83. Supplementary information for the IPTS-68 and EPT-76//Monographie Bureau International des Poids et Mesures. lst ed. July 1983.
84. Rusby R. L., Durieux M.//Cryogenics. 1584. Vol. 4. P. 363—366.
85. Boder M., Karow H. U., Mflller K.//High Temp.-High Press. 1980. Vol. 12. P. 161—168.

ГЛАВА 9

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

М. Н. Хлопкин

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Определение и единицы теплоемкости

Теплоемкость тела ***С*** есть отношение количества теплоты AQ, подведенной к телу в данных условиях, к соответствующему повышению температуры ЛГ. В соответствии с третьим началом термодинамики теплоемкость любого тела стремится к нулю при приближении к абсолютному нулю температуры.

Удельная **с, Дж**/(кг-К), и молярная **С, Дж**/(моль-К), теплоемкости вещества определяются как теплоемкости соответственно единицы массы и одного моля данного вещества. Они связаны соотношением С=Мс, где ***М*** — масса одного моля, кг.

Теплоемкость тела зависит от условий нагревания. Наиболее употребительны: теплоемкость при постоянном давлении (изобарная теплоемкость) Ср, теплоемкость при постоянном объеме (изохорная теплоемкость) Cv и теплоемкость под давлением насыщенных паров (вдоль линии сосуществования фаз) Cj. Величины Ср и Со, Дж/(моль-К), связаны соотношением

$$C_p - C_v = \frac{\alpha^2 V T}{\beta},$$

где а — температурный коэффициент объемного расширения, $\alpha = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$; ***Т*** — температура. К; V — молярный объем, м³/моль; β — изотермическая сжимаемость, Н/м² (Па). $\beta = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T$.

Теплоемкость твердых тел

Разность ср—с^ для твердых тел обычно невелика. Теплоемкость твердых тел за исключением твердого гелия, слабо зависит от давления.

Важнейшим параметром, характеризующим температурную зависимость теплоемкости твердого тела, является характеристическая температура Дебая (дебаевский параметр) 0, К, определяемая соотношением ftG=='iv, где А—постоянная Больцмана, Дж/К; ***h*** — постоянная Планка, Дж-с; v — максимальная частота колебаний атома в кристалле, Гц.

В соответствии с квантовой теорией Дебая молярная колебательная теплоемкость твердого тела Cv. Дж/(моль-К), определяется соотношением

$$C_v = 9Rn\left(\frac{T}{\Theta}\right)^3 \int_0^{\Theta/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x-1)^2}\,dx,$$

где i? — газовая постоянная, Дж/(моль.К); п — число атомов в молекуле: ***D*** — функция Дебая (табулирована в табл. 9.7); G — дебаевский параметр. К; ***Т*** — температура, К-

При температуре, большей дебаевской (7'>в), выполняется закон Дюлонга — Пти

$$C_v = 3Rn \approx 25n \text{ Дж/(моль-К)}.$$

При низкой по сравнению с дебаевским параметром температуре (Г<0,1 6) молярную теплоемкость твердого тела Сщ Дж/(моль-К), обычно представляют так:

$$C_v = 1944\, n(T/\Theta)^3 + \gamma T,$$

где n, Г и 6 — те же величины, что и в предыдущих соотношениях; Y — коэффициент электронной теплоемкости, Дж/(моль-К^). Для диэлектриков и полупроводников Y=0. Большие отклонения температурйого хода теплоемкости от приведенного выше соотношения наблюдаются в лантаноидах, актиноидах, их химических соединениях, а также при наличии в веществе магнитных ионов, когда существенный вклад в теплоемкость дают тепловые возбуждения электронов внутренних оболочек атомов и магнитных моментов ионов. Происходящие в твердом теле процессы упорядочения (структурного, магнитного, сверхпроводящего и др.) также ведут к существенным аномалиям теплоемкости.

Теплоемкость разреженных газов

Разность изобарной и изохорной молярных теплоемкостей Ср—Со, Дж/(моль.К), разреженных газов описывается соотношением Ср—Cv=R, где ^ — универсальная газовая постоянная.

Согласно закону распределения каждая поступательная и вращательная степень свободы молекулы дает в молярную изохорную теплоемкость вклад, равный ***RI2,*** а каждая возбужденная колебательная — вклад, равный ***R.*** Колебательные степени свободы возбуждаются и дают вклад в теплоемкость лишь при высокой температуре ***(Т>hVk,*** где V — частота колебаний атомов в молекуле). При учете поступательных и вращательных степеней свободы и пренебрежении колебательными закон равнораспределения дает для молярных изохорной Со и изобарной Ср теплоемкостей, Дж/(моль.К): **Со=1,5 *R;* Ср**=2,5 ***R*** — для одноатомного газа; **Со=2,5/?; Ср**=3,5i?— для двухатомного газа; **Со=3 *R;* Ср**=4 ***R*** — для многоатомного газа.

Эти соотношения хорошо выполняются для одноатомных газов, хуже для двухатомных и плохо для многоатомных. Теплоемкость двух- и многоатомных газов при низкой температуре меньше, чем следует из закона равнораспределения, вследствие уменьшения вклада вращательных степеней свободы. При высокой же температуре теплоемкость этих газов больше, чем следует из закона равнораспределения, вследствие термического возбуждения колебательных степеней свободы и частичной диссоциации молекул.

Теплоемкость плотных газов и жидкостей

Для плотных газов в отличие от разреженных разность молярных теплоемкостей Ср—Cv может существенно отличаться от универсальной газовой постоянной ***R.*** Молярная теплоемкость плотного газа, как правило, больше, чем разреженного. С приближением к критической точке теплоемкость газа возрастает и в критической точке обращается в бесконечность. Для описания теплоемкости жидкости не существует простых закономерностей.

Теплоемкость сплавов, растворов и смесей

Теплоемкость сплавов, растворов и смесей нескольких компонентов Ссм с небольшим отличием от идеальности приближенно удовлетворяет правилу аддитивности Коппа — Неймана

$$C_{см} = \sum_j z_j C_j,$$

где Zj — мольная (массовая) доля /-го компонента смеси; C_j — молярная (удельная) теплоемкость /-го компонента. Правило аддитивности хорошо выполняется для разреженных газов и хуже — для плотных газов. Существен-

ные отклонения от правила аддитивности наблюдаются в растворах электролитов, в ряде интерметаллических соединений, а также при наличии фазовых переходов.

Теплоемкость вблизи фазовых переходов

Для фазовых переходов первого рода (испарение, плавление, сублимация, переход из одной кристаллической модификации в другую и т. д.) характерно скачкообразное изменение энтальпии, что приводит к соответствующей скрытой теплоте перехода ***Б.Н.*** Теплоемкость при фазовом переходе первого рода, как правило, изменяется, причем теплоемкость высокотемпературной фазы может быть как больше, так и меньше теплоемкости низкотемпературной фазы.

При фазовых переходах второго рода происходит непрерывное изменение энтальпии, выделения скрытой теплоты не происходит, а теплоемкость испытывает скачок, сопровождающийся резким максимумом. При фазовых переходах второго рода теплоемкость низкотемпературной фазы, как правило, больше теплоемкости высокотемпературной фазы.

Справочная литература по теплоемкости

Термодинамические функции (теплоемкость, энтропия и энтальпия) индивидуальных веществ (элементов и химических соединений) при температуре 298,15 К приведены в [1]. В [2] приведены термодинамические функции индивидуальных веществ (преимущественно в газообразном состоянии) в широкой области температур. Теплоемкости элементов и бинарных сплавов в широком интервале температур содержатся в [3, 15]. Теплоемкости элементов, неорганических и органических соединений приведены в [4]. Теплоемкости материалов при температурах ниже 300 К содержатся в [5].

9.2. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

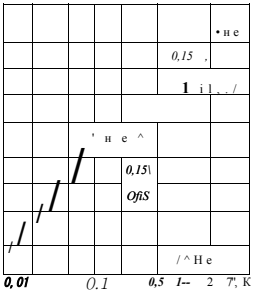


Рис. 9.1. Молярные теплоемкости Cs жидких изотопов гелия зне и "Не и растворов ^Не—"Не с молярной долей зНе, равной 0,05; 0,15; 0,48 при давлении насыщающих паров [51]

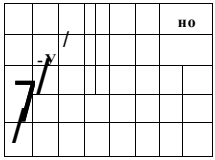


Рис. 9.2. Молярная теплоемкость гольмия [4]

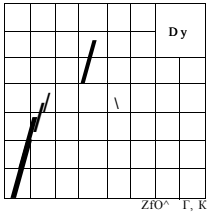


Рис. 9.3 Молярная теплоемкость диспрозия [41

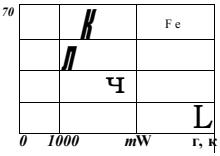


Рис. 9.4. Молярная теплоемкость железа вблизи ферро» магнитного фазового перехода [52]

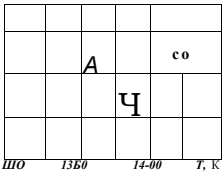


Рис. 9.5. Молярная теплоемкость кобальта вблизи фер« ромагнитного фазового перехода [53]

табл. 9. 1—9.7 и на рис. 9.1 —9.10 приведены значения теплоемкости элементов

Таблица 9. 1. Молярная изобарная теплоемкость Ср элементов при температуре 298,15 К и давление 0,10135МПа

Вещества в жидком и газообразном состояниях отмечены буквами «ж» и «г». Различные кристаллические мо-^аификации отмечены греческими буквами а, р, f, 8 и др. Теплоемкость газов приведена в состоянии идеального rtea, т. е. при предельно низком давлении. Химическая формула приведена лишь для неодноатомных молекул

Вещество, формула	Дж/(моль·К)	Вещество, формула	
Азот I (г)	29,12	Нептуний	29,46
.Актин:	27,20	Никель	26,07
! Алюминий	24,35	Ниобий	24.44
гв-американций	25,86	Р-Олово белое	27,11
; Аргон (г)	20,79	а-Олово серое	25.78
	28, 10	Осмий	24,70
плий	16,44	Палладий	25,86
Бор(кр) ^	11.09	Платина	25,86
Бор аморфный	11,95	а-Плутоний	31,20
Бром Bra (ж)	75.68	Полоний	26,40
Бром Bra (г)	36.06	а-Празеодим	27.45
Ванадий	24,48	Радон (г)	20.79
	26,02	Реий	25,23
Й-Водород Н, (г)	28,83	Родий	24,98
^ оршо-Водород На (г)	28,46	Ртуть (ж)	27,98
пара-Водород На (г)	29,95	Рубидий	31.05
	24.27	Рутений	24.06
в-Гадолиний	37.07	Самарий	29.54
Галлий	26.07	Свинец	26,65
Гафний	25.69	Селен гексагональный	25,36
Гелий (г)	20,79	Селен моноклинный	27,20
Германий	23,22	Селен аморфный	29,30
в-Гольмий	27.15	Селен Sea (г)	35,40
к-Дейтерий D^ (г)	29,20	Сера ромбическая	22,69
Диспрозий	28.16	Сера моноклинная	23,64
	27,66	Сера Sa (г)	32,50
	24,98	Сера Sg (г)	160,70
	26,74	Серебро	25,36
	25,40	Скандий	25.50
Индий	26,90	Стронций	25.51
Иод Ia	54,44	Сурьма	25,23
m Ч(г)	36.89	Сурьма Sb2 (г)	35,40
НИИ	25.10	Таллий	26,32
	26,74	Тантал	25.29
Иттрий	26,52	Теллур	25,78
Кадмий	**26,02**	Тербий	28,91
Калий	29,60	Технеций	24,00
Кальций	25,94	Титан	25,06
Кислород Оз (г)	29,38	н-Тритий Та (г)	29.20
Кислород, озон Оз (г)	39,37	Торий	26,23
в-Кобальт	24.8	Тулий	27,03
Кремний	19,79	Углерод, алмаз	6,109
Криптой (г)	20,79	Углерод, графит	8,536
Ксенон (г)	20,79	а-Уран	27,67
Лантан	27.11	Фосфор белый	23,82
Р-Литий	24,85	Фосфор красный	21.21
Лютеций	26,50	Фосфор черный	21,59
Магний	24.90	Фосфор Ра (г)	32,05
в-Марганец	**26.28**	Фосфор Р4 (г)	67,15
Р-Марганец	26,50	Франций (ж)	28,40
С тм	27,57	Фтор Fj (г)	31.30
	24,43	Хлор С!а (г)	33,94
Молибден	23,93	Хром	23.55
Мышьяк	24,68	Цезий	32,17
Мышьяк ASa (г)	35,10	**ЙГ"**	26,94
Мышьяк **AS**4 (Г)	77,40		25,44
	28,20	Цирконий	25,40
	27,40	Эрбий	25,44
Неон (г)	20,79		

Таблица 9.2. Удельная изобарная теплоемкость c_p, Дж/(кг • К), элементов при температуре от 20 до 1500 К и давлении 0.1 МПа

Изменение состояния вещества обозначено до и после фазового перехода: т—твердое, ж—жидкое, г—газообразное. Различные кристаллические модификации твердого состояния отмечены греческими буквами ce, Р, 7, 8 и пр.

	Температура, К								
	20	40	80	150	250	400			
Азот N,	**681 (а)**	1350 (Р)	1022 (г)	1048	1042	1045	1075		
Алюминий	**8,9**	78	376	675	858	951	1037 (т)	1177(ж)	
Аргон	306	560	836 (т)	526 (г)	521	521	521	521	521
Барий	67,4	135	168*1	186	198	259	300	328 (т)	281 (ж)
Бериллий	1,61	9,96	90,6	624	1560	2179	2559	3060	3604
Бор аморфный	8,9	7,1	58«	333	859	1463	1892	2337	
Бор (.ф)	2,2	1,5	42*1	299	816(7)	1416 (Р)	1931	2306	2597
Бром Вгг	79,6	181	253	308	**371 (т)**	230 (г)	233	236	239
Ванадий	7,1	39	174*1	370	**465**	515	540	597	714
Висмут	35	74	102*1	117		127 (т)	141 (ж)		
ч-Водород*2	9530(ж)	10 570(г)	10 730	12 600	14 040	14 480	14 550	14 980	16 050
иара-Водород*2	9530(ж)	10 570 (г)	11 720	16150	15 330	14 550	14 550	14 980	16 050
Вольфрам	1,89	18,4	71,5	113	131	136	140	148	158
Гадолиний	25,4	97	163*1	208	265	179	185	207	243
Галлий	32,1	ПО	221*1	316	375 (т)	394 (ж)	382	376	377
Германий	12,5	61	142*1	256	310	337	347	375 (т)	380 (ж)
Гольмий	58	124	197*1	161	163	169	172	193	271
а-диспрозий	34,5	115	201	280	173	173	175	195	274
Европий	65					184	199	250	
Железо*^	4,6	30	138*1	324	422	489	574	975 (а)	654 (7)
Золото	15,9	57,2	99,2	119	127	131	135	146 (т)	159 (ж)
Индий		141	193	218	229	250 (т)	245 (ж)	238	236
Иод I2	64'	124	171	195 (т)		313 (ж)	148 (г)	150	153
Иридий	2,0	22	68*1	ПО	125	129,5	135	150	
Иттербий	45,7	102	132*1	145	151	160	172	184	
Иттрий	21,3	101	199*1	265	292	305	321	354	
Кадмий	46	117	182	213	227	241 (т)	264 (ж)		
Калий	251	494	610	666	717 (т)	805 (ж)	770	797	
Кальций	36	188	405	575		655	738 (й)	1020 (Р)	
Кислород, О2	429(а)	1289 (Р)	1689(ж)	920 (г)	915	942	1003	1090	1143
Кислород, Оз (озон)		–	—	–	–	916 (г)	1048	1166	1243
Кобальт	5,4	39,6	162*1	331	405	450	503 (а)		674
Кремний (кр)	**3,37**	44	188	426	648	794	871		1013
Криптон*^	**188**	276	345 (т)	258 (г)	250	249	248	248	
Ксенон*^	133	178	202	261 (т)	162 (г)	159	159	158	
Лантан	46	ИЗ		182		197 (й)	197(Р)	238	247 (ж)
й-Литий	55,9	350	1390	–	–				
Р-Литий			1340	2653	3383	3974 (т)	4251 (ж)	4154	4203
Лютеций	20,9	73		141	151	153	156	173	217
и-Марганец	8,9	50,6	193*1	365	454	515	581		
р, 6-Марганец	21,7	71,6	201*1	378	465	–		686"(Р)	837 (8)
^-Марганец			190*1	372	470				
Медь	7,29	58776	202,6	322,6	373,3	397,5	416,7	45 М (т)	513 (ж)
Молибден	2,8	23,6	104	193	238	264	276	294	
а-Мышьяк	15,6	74,6	175	275	314	339	354	383	
й-Натрий	157	531			–	–			
Р-Натрий	170	540	879	1074	1176 (т)	1370(ж)	1296	1257	
Неодим	71	127	176*1	—	–	200	**222**	291	
Неон*2	945 (т)	1066 (г)	1035	1031	1030	1030	1030	1030	
й-Нептуний						147			
Никель	578	38	173	328	416	482	592	561	
Ниобий	11,3		173	239	262	270	**281**	304	
р-Олово белое	40	106	173	206	219	243 (т)	242 (ж)	240	
й-Олово серое	32,3	76	136*1		–				
Осмий	1,43				–	137	136	144	154
Палладий	9,5	52	132*1	207	238	251	261	281	307
Платина	7,4	38	88	118	131	136	141	152	165
Плутоний	15	56	74	94	121	138	154 (т)	171 (ж)	

Продолжение табл. **7.14**

	Температура, К									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
Празеодим	94,4	174	186	191	193	202	224	286 (т)	305 (ж)	[3]
Рений	2,8	27	75*1	120	132	139	145	158	–	[3, 5]
Родий	2,71	26,6	114	195	234	253	273	310	349	3, 121
Ртуть	51,5		116	129 (т)	142 (ж)	137	137	136		[12, 131
Рутений	1,71	19'	99	185	230	241	251	278	315	[3, **12]**
" Самарий	49	122	204«	175	188	221	271	301		[3]
Свинец	53	94,4	114	122	127	134	144 (т)	142 (ж)	138	[2, **5]**
7-Селен	43,5	108	193*1	274	309	354 (т)	445 (ж)			[3]
Сера ромбическая	80,6	192	340	517	—		—	—	–	[Ht]
Сера моноклинная*'	–	–	342	535	692 (т)	1004 (ж)	1068	1004	–	[3]
Серебро	15,5	78	166	212	232	239	250	277 (т)	310 (ж)	[3, 5]
Скандий	13,9	95,4	289	–	–	585	611	694	848	[2 **5]**
Стронций	54					313	343 (а)	441 (7)	411 (ж)	2
	25,8	83~	147*1	190	204	213	223 (т)	**258 (ж)**		3
Галлий	50	93	114*1	124	128	134 (т)	145 (ж)			3
Тантал	8,23	43	97,6	126	137	141	145	152	163	2, 5]
	33,5	88	151	180	193	219		295 (ж)		3, 5
	27,4	106	176*1	234	199	179		226	286	3]
Я Г				—	–	211	225	290	324	3
Технеций										
Титан	гТо	57	230	406	498	548	597	684	687	2, **5]**
о-Торий	20	61	90*1	108	115	123	134	156	–	**3f1**
Тулиий	63	187	146*1	154	158	161	163	186	209	31
Углерод (алмаз)	0,21	1,18	7,0	83	344	854	1342	1799	–	2, 3]
Углерод (графит)	6,3	27,9	87*1	269	568	994	1409	1799	2019	2, 3, 58]
	13,5	54	83*1	103	112	125	146 («)	180 т	201 (ж)	[3]
Фосфор белый	151	303	403	559	728 (т)	843 (ж)			—	[2]
Фосфор красный	27,3	89	198*1	436	626	748	832		—	[3]
Фосфор черный	13,4	73	204*1	447	639	850				3]
Фтор Fa	347	969 (т)	1502(ж)	–	–	869 (г)	928	979	1009	3]
Хлор CL	108	340	543 (т)	–	–	634 (г)	642	627	605	31
Хром	2,1	17	127	314	425	482	516	614	806	2
Цезий	147	179	192	203	220 (т)	240 (ж)	224	230	273	9]
Церий	**61,5 (Р)**					202 (т)	223	268 (т)	269 (ж)	3 1
Цинк	125	258	293	380	402	436 (т)	480 (ж)	–	**(3 5,**
Цирконий	11,7	68	165*1	244	273	300	321	362(а)	344 (р)	**[3j**
Эрбий*з	126	144	195	155	165	170	174	192	229	[3]1

При 7- = 75 К.
¡ См. также табл. 9.5.
¹ См. также рис. 9.2—9.10.

Таблица 9.3. Удельная теплоемкость Ср, Дж/(кг-К) элементов при температуре от I до 15 К и давлении 0.1 МПа (н) — в нормальном (несверхпроводящем) состоянии; (с) — в сверхпроводящем состоянии

Вещество	Температура, К								Литература
	.	2	3	4	5	8	to	15	
а-Азот	—	—	3,5	8,7	17,3	—	167	422	3
Алюминий	—.	0,11	–	0,30	–	0,9	1,41	4,6	5'
Аргон	0,06	0,49	–	4,35	–	42,5	83,3	–	7
Барий	–	0,12	0,34	0,78	1,54	–	14	38,5	[3]1
Бериллий	0,025	0,051	0,079	0,109	0,144	0,27		0,84	15-
Бром					2		16'	45	[3]
Ванадий (н)	0,19	0,38	0,58	0,80	1,04		2,34	4,24	[3]
Ванадий (с)	0,005	0,2	0,7	1,45	2,43				[3]

Продолжение табл. 9.10

	Температуса, К							
	t	2	3	4	5	8	10	1Б
Висмут	0,006	0,046	0,17	0,49		5,47	10,4	23,8
пара-Водород		4,98	17,4	43	89	450	1030	7100
Гадолиний	0,08	0,16	0,27	0,4	0,56	–	3,9	12,1
Галлий		0,024	0,051	0,1	0,19	–	3,46	14,8
Гафний	0,014	0,033	0,06	0,096	0,148	–	--	–
Гелий (г) «Не				—	6800	5550	5420	5300
Гелий (ж) «Не	110~	5000	3840	4080	–	–	–	–
Гелий (ж) зне	1430	2500		–	–	–	–	–
Германий	0,0006	0,0046	0,0155	0,036	0,069		0,86	4,43
Гольмий	18,7	6,24	3,37	2,74	3,22		16,4	39,8
орто-Дейтерий		6,5	22,6	55,5	113	545	ИЗО	
а-Диспрозий	0,24	0,17	0,22	0,32	0,54	–	3,9 ;	15,5
Европнй	0,24	1,3	2,9	4,9	7,4	–	26	57
а-Железо	0,09	0,18	0,28	0,38	0,5	0,9	1,24	2.49
Золото	0,006	0,025	0,07	0,16	0,29	1,2	2,2	7,4
Индий (н)	0,029	0,138	0,41	0,95	2,27	8,55	15,5	36,7
Индий (с)	0,019	0,142	0,464	–	–	–	–	–
Иод				–	2,3	–	16	40
Иридий		0,034	0,053	0,075	0,10		0,31	0,83
Иттербий	0,02	0,087	0,23	0,50	0,98	–	8,5	25,3
Иттрий	0,10	0,20	0,32	0,46	0,64	1,5	2,6	8,6
Кадмий	0,008	0,029	0,087	0,234	0,577	3,98	8,62	25,9
Калнй	0,12		2,24	5,45		42,0	71,5	
а-Кальций	0,08	0,18	0,32	0,53	0,86	–	5,3	16,2
а-Кислород	–	–	–	3,9	7,8	–	69	224
Кобальт	0,08	0,16	0,25	0,35	0,47	–	1,22	2,53
Кремний	0,0003	0,002	0,007	0,018	0,03	–	0,28	1,1
Криптон	0,064	0,53		4,82	–	42,0	71,5	–
Ксенои	0,057	0,49		4,74	–	38,1	58,3	103
я-Лантан (н)	0,07	0,15	0,31	0,54	0,91	–	8,2	25
а-Лантан (с)	0,006	0,10	6,36	0,83	0,97	–	–	–
р-Лантан (н)	0,09	0,20	0,38	0,66	1,11	–	–	–
Р-Лантан (с)	0,006	0,08	0,34	0,83	1,56	–	–	–
Литий	0,24	0,54	0,90	1,39	2,02	–	9,3	25,7
Лютеций	0,07	0,14	0,22	0,33	0,49	1,43	2,75	
Магний	0,055	0,117	0,19	0,29	0,44	1,08	1,9	5,8
а-Марганец	0,25	0,50	0,75	1,01	1,29	2,16	2,82	5,21
Медь	0,0116	0,0278	0,0530	0,0916	0,1482	0,4729	0,8709	2,907
Молибден	0,02	0,04	0,065	0,09	0,13	–	0,48	1,00
Мышьяк	0,004	0,014	0,04	0,09	0^18	–	1,5	6,1
а-Натрий	0,08	0,30	0,76	1,6	2,8	–	22,7	74
^Натрий				1,78	3,42	–	28,4	85
	1,07	5^0	11,0	18,9	27,2	41,5	36,5	51,9
Неон	0,24	1,96		17,7	–	159	278	–
Никель	0,12	0,24	0,37	0,50	0,67	1,19	1,62	3.1
Ниобий (н)	0,09	0,18	0,28	0,40	–	1,4	2,2	5,5
Ниобий (с)	0,001	0,014	0,087	0,27	0,56	2,28	–	–
а-Олово	0,0002	0,0014	0,005	0,12	0,46	–	6,0	18,9
Р-Олово (н)	0,017	0,047	0,109	0,245	–	4,2	8,1	22,6
Р-Олово (с)	0,004	0,048	0,151	–	–	–	–	–
	–	0,025	0,04	0,06	–	–	–	–
Палладий	0,09	0,18	0,29	0,42	0,56	–	1.9	4,6
Платина	0,03	0,07	0,12	0,18	0,27	–	1,17	3,5
а-Плутоний							3	9
Празеодим	0Т35	0,63	1,3	2,4	473	18,1	29,2	60
Рений (н)	0,015	0,025	0,04	0,06	0,08	–	0,29	0,9
Родий	0,048	0,097	0,147	0,201	–	0,47	0,65	1,35
Ртуть (н)	0,036	0,48	2,07	4,09	–	17,5	23,5	38
Ртуть (с)	0,029	0,48	2,09	4,17	–	–	–	–
Рубидий	0,16		4,36	10,4		54	81	–
Рутений	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	–	0,41	0,87
Самарий	0,14	0,23	0,43	0,78	1,45		17,5	37
Свинец (н)		0,094	0,281	0,684	1,48	7,37	13,7	33,5

Продолжение табл. 9.10

f Вещество	Температура. К >	2	3	4	5	8	10	15	Литература
J Свинец (с)		0,067	0,251	0,672	1,51				201
; Т-Сел€н	0,007	0,056	0,19	0,49	1,0	—	7,9	23.8	3]
j Пера ромбическая				—	1,69	—	15,4	46	1]
	0,0072	0,0239	0,0595	0,124	—	0,91	1,8	6,4	i:2]
iСкандий	0,267	0,505	0,747	1,00	1,3	2,5	3,31	7,0	5]
(.Стронций	0,05	0,14	0,31	0,61	1,09	—	8,45	27	3]
; Сурьма	0,002	0,016	0,055	0,11	0,3	—	3,5	12,3	3]
, Таллий (и)	—	0,06	0,43	1,02	2,0	—	15,3	33	3]
Тантал (и)	0,032	0,068	0,112	0,171	0,26	0,65	1,17	3,6	5]
Тантал (с)	0,006	0,054	0,178	0,352	—	—	—	—	i:2]
Теллур	0,005	0,039	0,14	0,33	0,65	—	7,01	20,3	3]
Тербий	1,45	0,50	0,43	0,55	0,68	—	3,7	14,3	3]
-Тетан	0,071	0,146	0,226	0,317	0,42	0,84	1,26	3,3	5]
я-Торий		0,05	0,11	0,19	0,42	—	2,9	9,4	3]
Тулй	0,25	0,38	0,79	1,44	2,35	—	11,6	32,7	3]
Углерод (графит)	0,003	0,018	0,052	0,11	0,17	—	1,05	3,5	3 5]
о-Уран	0,044	0,097	0,17	0,26	0,38	—	1,76	5,9	3]
а-Фосфор белый	—	—	—	—	3,5	—	36,2	97	2]
Хлор	—	—	—	—	—	—	20	54	[3]
	0,03	0,06	0,10	0,14	0,18		0,49	1,09	[3]
	0,28		8,3	16		61	83	—	[9]
а-Церий	0,15	0,33	0,55	0,83	—	—	—	—	[3]
		1,1	2,3	4,6	7,9		43	47	[3]
	0.01	0,027	0,055	0,105	0,191	0,76	2,36	11,2	17]
Цирконий	0,03	0,07	0,12	0,18	0,26	—	1,3	4,36	3]
Эрбий	0,26	0,24	0,38					40	3]

9.4. Удельная теплоемкость с^, кДж/(кг - К), жидкого гелия «Не под давлением насыщенных паров [21] при различной температуре (К)

т, к		т, к		т. к		т. К		. к	
1,8	2,81	2,1	7,51	2,4	2,38	3,4	2,97	4,4	5,11
1,85	3,26	2,15	9,35	2,6	2,27	3,6	3,26	4,6	5,94
1,9	3,79	2,17	12,60	2,8	2,34	3,8	3,60	4,8	7,53
2,0	5,18	2,2	3,98	3,0	2,49	4,0	3,99	5,0	11,5
2,05	6,16	2,3	2,64	3,2	2,69	4,2	4.48	5,05	13,5

Таблица 9.5. Зависимость удельной изобарной теплоемкости Ср, кДж/(кг • К), элементов в и газообразном состояниях от давления и температуры

Данные выше жирной горизонтальной черты относятся к жидкой фазе

т, к	Давление, МПа 0,1	1	10	100	т. к	Давлени,г. МПа 0,1	1	10	100
				Азот [6]					
70	2,023	2,012	1,903		300	1,041	1,056	1,197	1,355
80	1,022	2,089	1,997		400	1,045	1,053	1,121	1,271
90	1,068	2,099	1,968	1,701	600	1,075	1,078	1,104	1,201
100	1,069	2,269	1,998	1,774	800	1,122	1,124	1,137	1,198
120	1,057	т:зо9	2,220	1,685	1000	1,168	1,168	1,176	1,216
150	1,048	1,144	2,851	1,555	1200	1,204	1,204	1,209	1,238
200	1,043	1,083	1,619	1,484	1500	1,244	1,244	1,247	1,266

*Продолжение табл. 9.*10

T, к	Давление, МПа				*T.K*	Давление, МПа			
	0,1		10	100		0,1	•	10	100
					Аргон **Аг [7]**				
85	1,057	1,055	–	–	200	0,522	0,556	1,232	0,858
100	0,542	1.152	1,093	–	300	0,521	0,532	0,645	0,815
120	0,532	0,722	1,161	0,942	500	0,521	0,521	0,552	0,657
150	0,526	0,609	1,549	0,903	1300	0,521	0,521	0,526	0,556
					н-Водород ***Н^*** **[8]**				
15	6,98	6,8	—	–	200	13,53	13,59	14,07	14,82
20	9,53	9,17	7,61	–	300	14,31	14,33	14,54	15,14
30	10,83	23,26	10,60	–	600	14,55	14,55	14,59	14,97
50	10,48	12,12	15,53	9,64	1000	14,98	14,98	14,66	15,01
100	11,22	11,50	13,51	12,13	2000	18,27	17,41	17,14	17,04
					пара-Водород ***Н^*** **[8]**				
15	6.98	6,8	–	–	100	13,43	13,70	15,71	14,34
20	9,53	9,17	7,51	–	200	16,08	16,14	16,52	17,36
25	11,16	12,58	9,12	–	500	14,52	14,53	14,59	14,82
30	10,83	23.26	10,6	–	1000	14,98	14,98	14,99	15,01
50	10,54	12,18	15,59	9,7	2000	18,19	17,33	17.06	16,96

Г, К	Давление, МПа								
	0,01	0,02	0,05	0,1	0.2	0,5	1	10	70
					Гелий **Че [16]**				
2,5	5,82	2 ^	2,10	2,05	1,98	1,80	1.6	–	—
3	5,55	6,08	2,40	2,35	2,28	2,12	1,95	–	–
4	5,35	5,52	6,40	4.08	3,68	3,12	2,72	1,82	–
5	5,28	5,38	5,75	6,78	17,02	4,85	3,70	2,25	—
6	5,25	5,32	5,52	6.00	7,78	9,55	4,80	2,58	–
8	5,22	5,25	5,38	5,55	6,02	8,42	8,20	3,12	—
10	5,22	5,25	5,30	5,42	5,65	6,58	7,62	3,62	—
20	5,20	5,20	5,22	5,25	5,30	5,48	5,72	5,18	3,82
50	5,20	5,20	5,20	5,20	5,22	5,22	5,28	5,60	5,00
100	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,22	5,32	5,45
1400	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	–

T. к	Цавление. МПа						*т*, к	Давление, МПа					
	0.1	1	1	1	10	1	1		0,1	1	1	1	10	1	50
							Кислород **Ог [10]**								
70	1,696		1,694	1,676	1,628		150		0,920	1,039	2,204		1,537		
80	1,689		1,687	1,663	1,599		200		0,915	0,957	1,904		1,511		
90	1,686		1,681	1,645	1,562		300		0,920	0,934	1,084		1,319		
100	о Г т а		1,709	1,651	1,541		400		0,942	0,949	1,015		1,170		
ПО	0,947		1,780	1,681	1,532		600		1,003	1,006	1,031		–		
120	0,935		т ж г	1,742	1,531		1000		1,090	1,091	1,099		–		

Продолжение табл. 9.10

Т, К	Давление, МПа				*Т*, К	Давление, МПа			
	...		10	100		0.1	1	10	100
	Криптон Кр [7]					***Ксенон*** Хе [7]			
120	0,263	0,543	0,531		170	0,168	0,348	0,339	
150	0,258	0.557	0,520	0,441	200	0,165	0,356	0,338	0,294
200	0,252	0,291	0,776	0,502	300	0,160	оЛт?	0,699	0,286
300	0,249	0,259	0,424	0,404	500	0,159	0,163	0,208	0,248
500	0,248	0,251	0,281	0,353	1000	0,158	0,159	0,167	0,198
1300	0,248	0,248	0,251	0,268	1300	0,158	0,159	0,163	0,183
			Нет Ne [7]						
30	Т Т ш	2,027	1,852	—	70	1,037	1,103	1,973	1,467
40	1,066	Г Ш	2,030	1,500	100	1,033	1,062	1,339	1,426
50	1,042	1,267	2,557	1,490	200	1,031	1,03f	1,089	1,235
60	1,039	1,147	2,603	1,479	1000	1,030	1,030	1,031	1,035

Таблица 9.6. Дебаевский параметр 6, К, и коэффициент электронной теплоемкости 7, мДж/(моль • К^), для элементов [22]

Везде, где возможно, дано значение 6 при предельно низкой температуре; обозначения: кр — кристаллический; ам — аморфный

		т	Вещество	*в, К*	т
Азот [23]	**81**	0	Кальций	229	2,73
Алмаз	2250	0	а-Кислород [28]	126	0
Алюминий	433	1,35	^^Кислород [29]	46	0
Америций	121	27		460	4,4
Аргон	92	0	Кремний (кр)	645	0
Барий	111	2,7	Кремний (ам) [27J	528	0
Бериллий	1481	0,17	Криптон	72	0
Бор (кр) [22, 4]	1219—1480	0	Ксенон	64	0
Бор (ам) [4]	1102	0	Кюрий	123	
Бром [4]	111	0	а-Лантан	150	9,45
Ванадий [29]	382	9,82	Р-Лантан	140	11,5
Висмут	120	0,0085	Литий	344	1,65
пора-Водород [12]	122	0	Лютеций	183	8,19
Вольфрам		1,01	Магний	403	1,26
Гадолиний		6,38	Марганец	409	12,8
Галлий	326	0,60	Медь	347	0,69
Гафний	252	2,15	Молибден	423	1,83
Гелий, г. п. у. [26	27	0	Мышьяк (кр)	282	0,19
Германий (кр)	373	0	Мышьяк (ам) [27]	159	–
Германий (ам) [27]	315	0	Натрий	156	1,38
Гольмий	190	6(1)	Неодим	163	
Графит	413	0,014	Неон	75	0
I-Дейтерий [12]	114	0	Нептуний	259	1,37
	183		Никель	477	7,04
Европий	**118**	6 (1)	Ниобий	276	7,8
Железо	477	4,9	сс-Олово серое [12]	212	0
Золото		0,69	р-Олово белое	200	1,78
Индий		1,66	Осмий	467	2,05
Иод		0	Палладий	271	9,45
Иридий__	420	3,14	Платина	237	6,54
	118	2,9	Плутоний	206	25(1)
Иприй"		8,2	Празеодим	152	
Кадмий	210	0 69	Протактиний	185	5
Калий	91	2^08	Рений	418	2,29

Продолжение табл. **9.10**

Вещество	в, к	т	Вещество	е, к	т
Родий	512	4 65	Тербий	176	4,1
Ртуть	72	1,'86	Технеций	454	4,0
Рубидий	56	2,63	Титан	420	3,36
Рутений	555	3,1	Торий	160	4,08
Самарий	169	13,5	**Тулий**	200	–
Свинец	105	2,99	**Углерод (алмаз)**	2250	0
Селен (кр)	152	0	Углерод (графит)	413	0,014
Селен (ам) [29]	123	0	**Уран**	248	8,14
Сера [4, 12]	165—180	0	**Фтор [4]**	78	0
Серебро	227	0,64	Хлор [4]	115	0
Скандий	346	10.3	Хром	606	1,42
Стронций	147	3,64	Цезий	40	3,97
Сурьма	220	0,12	Церий	179	12,8
Таллий	78	1,47	Цинк	329	0,64
Тантал [22, 30]	245	5,4—6,9	**Цирконий**	290	2,77
Теллур	152	0	**Эрбий [22, 31]**	188	10

Таблица 9.7. Зависимость дебаевской функции теплоемкости Г) (б/Г) от б/Г [32]

6/Т	0	. 1 =	3	4	5	' 1	8	9	,0
θ(e/T)	0,952	0,825	0,663	0,503	0,369	0,266	0,191 '	0,138	0.101	0.076

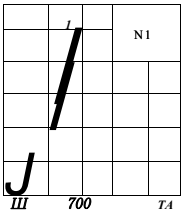


Рис. 9.6. Молярная теплоемкость никеля вблизи ферромагнитного фазового перехода [54]

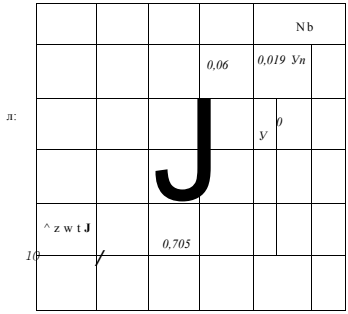


Рис. 9.7. Молярная теплоемкость ниобия пр ных значениях магнитной индукции У '

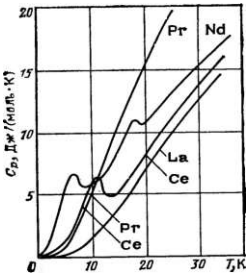


Рис. 9.8. Молярная теплоемкость лантана, неодима, празеодима и церия [4]

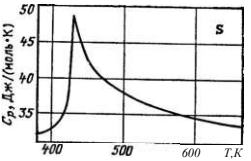


Рис. 9.9. Молярная изобарная теплоемкость жидкой серы [4]

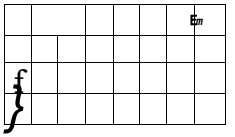


Рис. 9.10. Молярная теплоемкость эрбия [4]

9.3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИИ

В табл. 9.8—9.11 приведены значения теплоемкости для различных неорганических соединений.

Таблица 9.8. Дебаевский параметр 6, К, и коэффициент электронной теплоемкости 7, мДж/(моль • К^), для неорганических соединений

Вещество	Формула	е	7	Литература
Ванадия галлид	VsGa	302	97	34]
Ванадия германид		392	30	35
Ванадия силицид		501	62	[35
Галлия антимонид	GaSb	269	0,002	[18
Галлия арсенид	GaAs	345	0,0008	[18
Железа сульфид	FeS,	645	0	[12
Индия антимонид	InSb	206	0	[18
Индия арсенид	InAs	251	0	18
Калия хлорид	KC I	230	0	12
Кальция фторид	CaF,	475	0	12
Лития фторид	LiF	736	0	12
Магния оксид	MgO	800	0	12
Натрия хлорид	NaCl	275	0	12
Ниобия алюмьнид	NbsAl	280	32	35
Ниобия станид		228	52	36
Рутил	TiOo	778	0	37
Сапфир	Al2O3	1042	0	**38**
Серебра бромид	AgBr	144	0	**12**
Серебра хлорид	AgCl	183	0	12
Хрома германид	CrgGe	473—670	14—16	35
Хрома силицид	CrsSi	620—670	10-12	35
Цинка сульфид	ZnS	270	0	12]

Таблица 9.9. Молярная изобарная теплоемкость Со, Дж/(моль • К), неорганических соединений при температуре 298,15 К [1]

Твердые тела и жидкости — при давлении 0,1013 МПа, газы — в состоянии идеального газа (г—газ, ж — жидкость)

Вещество и состояние	S	Вещество и состояние	
AgBr	52,3	AlF (г) [2]	31,9
AgBr (г)	36,6	AlN [2]	30,1
	112,5	a-AlgOs [2]	79,0
	50,8	гA1,Oз [2]	82,7
AgCl (г) [33]	35,8	a-Al^Os • H2O	105,5
AgClOa	87,3	7-Al2O3 • H2O	131,2
	29,3	A1r (S04)3 [2]	259,4
	57,0	Al^TiOs	136,4
AglOa	102,9	ASCl3 (Ж)	133,5
AgMg	50,2	ASF3 (Ж)	126,6
	79,1		64,6
	102,9		38,6
ALO'	65,9	AsN (г)	30,5
Ag.S	76,5	AS40e	203,8
Ag2S04	131,4	ASPB	116,5
	81,8	AuSb,	79,5
Ag,Te	88 7	AuSn	50,5
AlBr (г) [2]	35,6	BBr (г) [2]	32,8
AlBГ3	100,5	BBrз (г) [2]	67,8
Al4C3	116,8	B4C [2]	53,1
AlCl (г) [2]	34,7	BCl (г) [2]	31,7

Вещество	C_P	Вещество и состояние	C_P	Вещество и состояние	P	Вещество и состояние	C_P
BCl₃ (г) [2]	**62,6**	CdI_2	78,7	GeF	**ii**	82,0	$KMnO_4$
BF (г) [2]	29,6	CdMg	51,6	G		45.0	KNO_3 [2]
BP₃ (г) [2]	50.5	CdO	43,6	Се пыз **О И**		54.8	K_2O [2]
BH (г) [2]	29,2	CdS	47.3			104.2	KOH [2]
	57.6	α-$CdSO_4$	99.6	Geo т		52.1	$KReO_4$
	217,9	CdSb	45.7			81,3	K_2SO_4 [2]
	19.7	$CdSiO_3$				29,1	La_2O_3 [2]
BN (г) [2]	29,6	CeN	46',4	HCN (ж)		70,6	$LiAlO_5$
BO (г)	29.2	CeO_2	**61,6**	HCN (г) [2		35.9	LiBr [2]
	60.3	$Ce_2(SO_4)_3$	270.3	HCI (г)		29.1	LiBr (г) [2]
	62.8	Cl_2CO (г) [2]	57.8	HD (г)		37.5	Li_2CO_3
	81.3	ClF (г) [2]	32,1	HF (г)		30.2	LiCl [2]
BACO₃ [2]		ClF_3 (г) [2]	64,1	HI (г) ,		**28,8**	LiCl (г) [2]
BACIr [2]	75 JI	Cl_2O (г) [2]	47,8			43,2	LiD
BaC!^ • 2H,0	203,3	ClO_2 (г) [2]	42	HIo5(гГ[33]		45.8	
	71.1	$CoCl_2$	78.5	HNO_3 ж)		109,9	
	30.2			HNO_3 (Г)		54.2	**TIIL'^'**
	151.6		55:2	HNO_3 • H^O		182.4	LjH [2]
№	47,0		122,8	**ЙЙЙ'Й'**		75.3	LiH (г) [2]
ад	102,1		103.2			33.6	LiI
	102,5		85.4	**й й й'**		89.3	$LiNO_3$
BeH (г) [2]	29,2		240,1	HOC1 (г)		43,1	Li_2O [2]
	64.8		91.8			37.1	LiOH [2]
ИЙ-Г	25.6		78.7			**106,1**	LiOH · H_2O
BeS04 [2]	85.7	[2]	**128,1**	HMr) [2J		32.5	LiT
BiCb	109		52.9			34.2	Li_2TiO_3
Bi,03	113,8		52.5			138,9	MgB_2
Bi'Tl	73.6		108.4			84.4	MgB_4
BrCl (г) [2]	35.0		51.1	(ж)		214.8	$MgCO_3$ [2]
BrF (г) [2]	33.0		40.6	H,Se(r)		34.7	$MgCl_2$ [2]
BrFs (ж)	124.5	[2]	31.6			35.6	$MgCl_2 \cdot H_2O$
BrP₃ (г) [2]	67.4		52,5			120.5	$MgCr_2O_4$
BrPB (г) [2]	101.3		54.7			60.3	MgF_2 [2]
BII (г) [2]	36.5		48.5			76.1	Mg_3N_2
CCl4 (ж)	131.7		71,9	HgCl (г)		36.4	MgO (г) [2]
	82.9		54.0	HgCU (г)		57.7	MgO [2]
S'VW	29,2		90.8			78.2	$Mg(OH)_2$ [2]
	57.1		42,3	**ill-ir-'**		61,1	$MgSU4$ [2]
	29,1		63.6			44.1	MgSi03
	37.1		47.8			44.2	MgSi04
	62.2		76,3			132,0	MgTi03
cos (г) [2]	41.6	α-$CuSO_4$	98.9			34.5	
CP (г) [2]	29,9	Cu_3Sb	76,6			56.2	
CS (г) [2]	29.8	D_2O [2]	84.3			35.6	MnCO₃
CS, (ж)	75.7	D_2O (г) [2]	34.4			33,5	MnCU
gnr) [2]	45,5	F_2O (г) [2]	43.5			57.3	**MnF^ (I)**
	62.7	Fe_3C	105,8			96.2	MnO
CaCO₃ [2]	83,5	$FeCO_3$	83.3			67,1	P-MnO,
Sih'l'	**72.8**	Fe (CO)₅ (ж)	240.6			52,5	MI2O3
CaFePa	67,0	$FeCl_2$	76.4			36.9	
	153.6	$FeCl_3$	94,9			104.9	**Kf'**
Ca (N63)2	114,6	$FeCo_2O_4$	143.3			51.3	MnS04
CaO [2]	149.4	$FeCr_2O_4$	133.7			36,5	MnSe
Ca (OH)2 [2]	42,0	FeF_2	68.1			100.3	ct-MnSiOg
	82.5	ε-Fe_3N	122,6			110,2	MnTe
	145,1	FeO	49,9			146,0	Mo (CO)б
	231,6	α-Fe_2O_3	103.8			49,0	
	236	Fe_3O_4	150.8			37,9	
	47,4	α-FeS	50.5			31.0	ct-MoSg
	91,7	FeS_2	62.2			126,7	MoSig
	99,7	FeSi	48,5			76,9	Mo3Si
	85.2		132.9			116.6	
	128,6		99,5			52.8	**SSIII**
	97.6		92,1			37.1	NH3 • 0,5 H2O (ж)
CdCla'	76,6		101,7			106,0	NH3 • H2O (ж)

Продолжение табл. 9.9

48,4	T-NiS
84,1	NiS04
65,3	NiTe^
142,2	NpOs
135,5	**PB₃** (г)
139,1	PCI3 (г)
187,4	PCI5 (г) [2]
129,3	PFs (г) [21
29,9	**PH₃** (г)
37,2	PN (г) 12]
38,6	P3N5
79,2	**POCI3** (г) 12]
143,1	**POC!₃ (ж)**
95,3	**P4oi„**
44,7	P4Ol0 (г)
53,2	**PbBr, (к)**
41,3	PbCla [2]
31,8	a-PbFa
73,3	PbO (жсл.) [2]
86,7	PbO (краен.) [2]
65,9	PbO (г) [2]
51,4	PbO, 12]
36,3	**Pb.O₃** [21
112,3	**Pb₃04** 121
50,5	PbS [21
35,8	PbS04
110,4	PtS
46,8	PtSba
36,4	PuO, [21
30,2	**Pn,O₃** [2]
88,2	RbBr [2]
52,1	RbCl [2]
36,6	**PbClO₃**
93,0	RbF [2]
72,1	Rbl [2]
69,1	RbgO [2]
89,3	RhO
59,5	Rh^O
120,1	Rh,03
128,0	SFe **(Г)** [2]
111,9	SO **(Г)** [2]
125,6	SO2 **(Г)** [2]
37,5	**SO3 (Г)** [2]
57,7	SOCl2 (Ж)
132,0	SOCI, **(Г)**
72,5	SOF, **(Г)**
71,7	SbCl3
64,1	
44,3	

47.1	**SbCls (Г)**
67.7	SbaOe (куб.)
75,9	Sb40e (ромб.)
66.2	8c,O₃
76,1	SeF, (г)
71.8	SeO (г)
113,3	SiBr^ (г)
58,7	**a-SiC [2J**
37.1	**p-SiC (21**
29.7	SiCl4 (Ж)
150,6	SiCU (г)
84,4	SiF4 (г)
138,8	SiH4 (г)
215.6	SiOa (кварц) [2]
191	SiOa (стекл.) [2]
56.9	8ПВГ4 (Г)
77,0	**SnCl, [2J**
72.3	**SnCl, (г) [2]**
45.8	{i-SnNig
46.4	**SnO [2]**
32.5	**SnO (г) [2]**
61,0	**SnO, [2]**
107.7	SnPt
146.7	**SnS [2J**
49.5	**Sn S (г) [2J**
103,2	Sn S,
43,4	**SrBr, 12]**
68.6	SrCl, [2]
66.2	3rCOo3 [21
117,0	**SrO [21**
52,8	**SrO (Г) [2]**
52,3	SrS04 [21
103,2	**SrTiOg**
50,6	TaC
52,6	TaN
74.0	**TeFe (Г)**
48.1	**TeO,**
73.2	ThF4
103.8	ThN
97.0	**ThO, [2]**
30,2	TiB,
39,8	TiC
50.6	TiCl (Г)
120,5	TiCl2
66.7	TiCls
57.1	TiCl4 (Ж)
110,5	

77,4	g-TiN
209	**TiO [21**
224	TiOa (рутил) [2]
94,1	**TiOj,** (анатаз) **[21**
110,4	***mnO₃ m***
31.1	TisOs [2]
97	TiS,
26,8	**TlBr**
26,8	**TlCl [2]**
145.2	**TlCl (г) [2]**
90.4	**T1F [2i**
73,6	TINO3
42,9	UCI3
44,6	**UCL4**
44,0	**«-UF4 [21**
103,0	**tJFe** [21
78.0	**IJF, (Г) [2]**
54,6	P-UH3
99,6	UO, **[21**
47,8	UO3 **[2]**
31,8	UsOe [2]
53.2	UOCl2
50,2	**UO,F, [21**
49,2	a-V^C
34.5	VCI,
70.1	VCI3
76.5	V,o3 **[2]**
75.6	**V2O4** [2]
82,4	[21
45.0	V3Si
33.1	a-WC
102,0	WO3 [2]
98,4	Y.O3 **[2]**
36,8	ZnC03
42.7	***ZuCh***
117	
64	ZnFe^Oi
110,7	**ZnO**
45.2	**ZnS**
61.8	a-ZnS04
45,6	Zn2Si04
34.3	**Zn2Tio4**
37,2	**ZrCla**
69,8	**ZrN**
97,1	**ZfgNa**
145,2	**ZrO, [2]**
	ZrSi04

Таблица 9.10. Молярная изобарная теплоемкость c_{p}, Дж/(моль • К), неорганических соединении при температуре от 20 до 1500 К и давлении 0,1013 МПа [2, 4]

Теплоемкость газов дана в состоянии идеального газа, т. е. при предельно низком давлении. Изменение состояния вещества обозначено до и после фазового перехода: т — твердое, ж — жидкое, г — газообразное. Различные кристаллические модификации твердого состояния отмечены греческими буквами а, р, 7 и др.

Температура, К								
20	40	80	150	250	400	600	1000	1500
	28,28	42,59	48,87	51,88	58,95	71,84 (т)	37,34 (г)	37,36
8,71	22,30	37,95	46,94	50,41	58,86	61,63 (т)	37,24 (г)	37,28
15,31	28,03	42,72	50,12	53,48	64,68 (т)	–	37,36 (г)	37,38
11,30	27,82	52,59	71,04	86,48	112,3	–	–	–
12,72	38,49	73,81	99,16	123,5	144	167	–	–
					36,40	37,11	37,62	37,98
		17,20	42,76	67,40	86,28	97,31	100,83	105,86
0,076	0,691	6,89	31,98	67,01	96,19	112,85	124,53	132,42
0,08	0,71	6,95	31,97	66,90	–	–	–	–
11,40	29,12	48,24	68,58 (т)		71 ,9 (г)	77,2	82,9	
18,28	44,97	50,28	46,79	90,71 (т)	45,4 (г)	53,1	63,8	75,7
					36,28	36,90	37,20	37,28
		2768	14,73	41,13	77,87	96,76	112,33	128,61
12,13	29,29	47,20	103 ,05 (т)		57,55 (г)	67,07	75,80	79,50
5,02	21,30	44,18	75,44 (т)	–	74,07 (г)	101,36	136,44	157 ,57
0,272	1,08	3 88	8,77	16,33	27,00	35,23	44,31	48,58
0,23	3,22	15^82	33,15	53,44	78,52	97,83 (т)	130,18 (ж)	128,44
		41,05	64,14	80,21	100,18	**111,39**	143,97	–
2,51	12,47	35,19	58,49	60,64	75,07	**81,67**	93,92	–
		26,78	39,66	46,02	49,96	53,20	57,17	60,55
5,48	21,76	49,25	72,38	93,97	118,76	137,01	161,69	–
		31,51	66,78	95,48	112,90	121,30	128,1	134,60
		1,67	7,95	20,46	33,63	42,31	48,72	52,30
		52,72	81,50	107,6	116,90	123,60	–	–
					34,52	36,15	37,32	37,95
					72,72	78,03	81,20	–
14,02	34,14 (т)				29,34 (г)	39,44	33,18	35,21
5:13	19,62	35,91	47,72 (т)		41,33 (г)	47,33	54,32	58,40
11,00	27,70	40,25	72,33 (т)		45,85 (г)	51,16	56,77	59,86
11,97	27,82	41,09	55,64	75,27 (т)	49,46 (г)	54,35	58,90	61,04
		31,80	55,56	75,23	96,98	109.86	124,53	139,30
		40,88	61,30	70,71	75,30	78,81	84,34	
		20,0	46,19	62,93	74,86	78,35	91,25	125,40
0,08	1,26	**9,71**	27,15	41,46	46,98	50,72	53,36	55,10
0,92	5,69	**22,84**	53,56	79,37	96,04	106,26	121,34	–
		36,90	65,44	90,92	117,02	135,38	159,27	–
		26,07	59,71	89,16	112,70	123,1	130,3	134,80
7,49	19,75	43,18	63,43	72,30	77,32	85,35	–	–
8,79	25,31	44,89	66,32	114,6 (т)	71,34 (г)	77,19	80,83	82,13
				–	49,00	53,1	56,1	57,30
					45,86	51,13	55,61	57,49
3T28	9,43	25,78	48,03	64,06		–	–	–
0,84	3,43	20,92	56,40	88,35	113,1	127,90	147,3	–
3,75	15,29	29,79	51,84	72,68	–	–	–	–
		15,02	51,04	96,9	112,4	122,00	127,4	133,2
	I9T5O	36,11	46,78	52,79 (т)	36,63 (г)	37,04	37,24	37,31
0,59	3,51	12,38	26,12	39,11	46,82	50,84	58,87	–
	18,95	35,65	47,53	54,90	71,88	76,65	86,19	–
		42,93	61,92	73,55 (а)	97,28 (р)	97,28	–	–
—					47,61	52,43	55,86	57,11
		32,30	66,61	101,5	115,60 (а)	114,7(Р)	119,70	126,0
		42,17	64,10	74,43	79,66	83,09	–	–
0,38	3,99	21,20	56,27	92,22	129.1	140,8 (а)	150,6(3)	143,7(7)
		37,45	92,76	131,8	172,2	212,5 (а)	200,8 ф)	200,8
1,1	6,99	20,9	36,12	47,11	65,9 (а)	57,02 (т)	61,00	–
0,46	5,56	23,47	53,30	81,92	105,53	116,78	126,98	135,78

Вещество	Температура. К								
	20	40	so	150	250	400	600	1000	1500
GeF4						90,03	98,61	104,34	106,37
HBr	11,05	20,50	39,33	46,88 (T)		29,21 (Г)	29,87	32,33	34,74
HCN	3,49	12,48	28,52	42,32	60,84 (T)	39,42 (Г)	44,19	50,79	56,40
HCl	5,86	15,69	27,99 (T)		–	29,16(г)	29,71	31,76	
HF	2,51	9,04	16,95	25,57 (T)	–	29,19(г)	29,23	30,17	32,33
HI	14,14	23,26	37,40	45,58 (T)	–	29,29 (Г)	30,12	32,34	35,27
HNO3	5,18	18,69	36,92	51,76	111,5 (T)	63,40 (Г)	–	–.	
H'O*!	1,98	6,12	12.82	21,95	34,71 (T)	34,16(г)	36,29	41,54	
	1,23	6,90	20,48	35,31	51,46 (T)	46.48 (Г)	53,52	62,62	
H₃PO,	4,23	16,4	35,5	60,2	91,3				
H,S	5,23	14,90	30,59	56,32 (T)		35,66	39,05	45,97	51,78
H,S04	7,24	21,84	39,37	59,79	88,58	–	–		
H,Se	–	–.	37,7	54,85 (T)		36,28	40,21	47,24	
HIOo	–	–	–		–	66.97	73,13	79,73	86,13
HgCl	8,03	29,00	37,53	44,64	49,45 (T)	36,74(ж)	37,11	37,28	37,36
Hgo	5,44	15,02	25,32	31,40	41,45	–	–	–	–
К Г									
ICl (г)						36,99	37,40	37,78	38,07
						36,40	37,11	37,66	37,99
KBr	6,94	23,18	39,92	47,94	50,88	53,32	56,64	64,62	
KCl	2,84	15,64	34,48	45,18	49,88	52,98	55,89	64,03	
KF	1,16	7,92	25,48	40,71	47,70	51,72	55,29	60,99	
KHjPOi	3,21	17,67	46,36	75,06	104,0	–	–	–	
KMI104	12,89	35,23	61,92	87,86	110,6	•	–	–	
K2S04	–	–	68,24	96,86	120,5	146,84	174,46		
Li'COs	0,96	6,74	26,07	55,56	85,77				
LiF	0,08	0,75	7,78	24,85	38,07	46,38	51,57	59,18	
Li'O	0,063	0,54	5,61	24,45	46,93	63,98	73,23	88,73	117,4
WgCOg			15,82	43,85	68,62	89,87	107,70	135,88	
WgCl.	–		31,34	55,44	68,16	75,62	79,85		
MF»	–		14,77	37,66	56,48	69,75	75,94	80,31	83,20
Mg6	0,088	0,53	4,54	18,73	33,30	42,77	47,30	50.87	53,34
Mg(OH),	0,34	2,83	13,74	40,96	68,78	81,00	94,22		
a-MrraC	–	–	31,38	62,84	86,61	104,4	115,0	127,4	
MnClo	–	–	38.50	60,58	70,71	77,15	81,84		
MnFo	4,97	17,02	29,6	49,1	64,1				
MnO			21,80	33,14	41,51	47,45	50,33	54, Ы	58,49
Zt			41,84	61,84	93.72	109,0	120,8	137,2	
			33,14	49,16	48,95	50,71	52,22	55,23	58,99
Jl10O8	1,63	6,99	23,77	47,70	67,99	82,56	92,27	107,63	
MosSi	–		34,12	69,02	88,57	97,02	102,3	110,7	120,5
NHs*'	1,54	7,61	20,77	38,65 (T)		38,67	45,23	56,24	65,94
N,H4	1,46	8,91	24,96	42,03	59,75 (T)	63,2 (Г)	76,5	93,3	107
NH4HJPO4	4,18	17,77	46,53	131,80	125,20				
NH4O3	4,21	20,07	48,74	82,92	128,13	–	–.		
NO	7,03	17,28	30,21 (T)			29,95 (г)	31,24	33,99	35,79
N,0	6,32	21,46	37,45	51,06(T)		42,87 (г)	48,86	56,02	60,45
N A	8,49	28,70	52,55	76,82	107,20 (T)	90,46 (г)	105.45	118,6	124,0
N,05 (Г	–	–	–	–	–	106,8	121,9	136.4	143,0
NaBH4	1,59	10,54	31,71	57,86	80,00	94,56	108,6		
NaCl	1,42	10,04	29,37	44,10	48,86	51,92	55,53	65,52	
NaF	–		16,15	34,23	44,43	51,03	54,58	61,35	
NaNOg	3,77	17,32	43,56	66,02	84,22	113			
Na..0	–	–	–			73,93	80,64	91,85	
NaOH	–	–	20,67	41,30	55,44	66,64	86,04	84,57	84,56
	2,43	17,06	53,39	89,70	117,6	145,3	176,88	209,0	
Na!si03	–	–	36,15	73,26	102.2	130,6	148,0	168,9	–
Na.JiOs	–	–	34,64	78,16	114,4	140 (a)	151,3 (p)	179,7	–
NbjAl [39]	3,08	17,44	47,84	76,24	91,32	100.1		–	–
NbsSn [39]	5.04	22,84	56,28	81,60	93,80	99,80			
NiCI,	3,29	13,08	35,19	57,66	69,04	75,40	79,79	85,94	
NiO	–		9,25	24,89	39,41	52,13 (a)	51,84 (f)	55,23	59,45
PH3	10,29	40,88	50,46	60,51 (T)	_	41.80 (г)	50,92	64,31	72,84

Продолжение табл. 9.10

Вещество	Температура, К								
	20	40	80	ISO	250	400	600	1000	1500
PbCla	12,55	33,64	55,40	67,95	74,98	80,72	85,73	—	–
PbO (красная)	—	—	22,94	34,70	43,45	48,73	52,92	–	–
PbO (желтая)			23,82	35,20	43,57	–	–	57,95	–
Rbl	15,06	34,73	46,02	50,38	52,30	53,5	57,35	–	–
SFe	22,64	42,93	60,63	75,13(т)	–	117,9 (г)	133,5	147,2	158,1
SO,	6,95	24,18	43,18	57,53	86,65 (Т)	43,47 (Г)	48,99	54,52	57,11
SbP4	—	–	37,99	72,26	106,9 (т)	121,7 (ж)	135,2	162,3	–
SeF, (г)	–	-	–	–	–	127,9	141,3	150,7	156,6
SiC	—	–	2,38	10,00	22,07	34,19	41,24	47,72	51,26
SiH4	9,41	26,19	51,46	61,35(Т)	–	51,42 (г)	65,84	84,49	95,46
SiO, (кварц) 12. 4, 33]	1,00	3,93	11,92	24,94	39.33	53.42	64,52	68,94	74,00
SiO^ (кристоба-лит) [33]	—		12,05	25,02	39,29	53,14	65,35	72,97	73,05
SiO^ **(тридимит) [33]**	—	—	12,47	25,52	39,79	61,50	63,68	68,12	73.64
SnOa	—	—	15,48	32,89	49,08	^ 65,09	74,28	81,18	86,10
SnS	–	–	29,29	41,76	47,82	51,00	56,08 (т)	56,57 (ж)	74,90
SrCOg	—	–	34,77	59,77	75,65	97,09	106,29	125,75	–
SrO	–	–	18,20	34,31	43,26	48,45	52,04	56,31	60,14
SrS04	2,88	16,31	43,91	69,81	92,99	117,94	135,91	161,00	–
TaC	–	–	15,65	24,18	33,43	–	–	–	–
ThOa		—			—	67,69	72,74	77,61	82,29
TiC	—	—	4,23	15,73	29,37	41,46	47,32	51,34	53,85
TiCU (г)	–	–	25,02	49,12	64,10	100,8	104,3	106,5	107,6
TiO	—	—	8,54	22,89	36,07	46,58	50,73	57,76	–
T i A	–	—	17,03	51,46	87,45	119,24	136,38	143,47	158,02
иС'з [33]	-	-	-	-	-	97,15	105,1	115,2	118,4
UF4	5,13	20.49	53,14	89,39	111,90	121,75	125,80	133,38	–
UFe	17,0	40,31	80,32	118,3	152,40 (Т)	139,80 (г)	148,98	154,54	156,42
UO2	4,19	11,03	23,28	42,13	59,25	73,43	79,13	82,70	90,97
v c	–	—	6,99	18,37	29,71	43,51	48,49	53,64	58,53
VsGa [40]	–	–	43,7	72,4	89,8	109,6	–	–	–
VgCe [41]	1,62	9,44	40,0	74,16	90,52	–	–	–	–
V P s	—	—	18,20	60,54	95,48	117,05	127,46	133,09	139,29
VsSi [41]	1,72	7,6	32,9	66,3	85,9	–	–	–	–
WC [33]	—	—	—	–	—	37,03	38,83	42,47	47,03
WO3 [4, 33]	—	–	24,43	49,92	73,39	83,62	–	–	–
ZnF^	0,98	6,95	23,86	46,44	61,76	–	–	–	–
ZnO		—	—	25,86	37,03	45,33	49,50	53,18	56,23
ZnS	1,67	8,20	19,83	34,43	43,26	49,41	52,38	55,48	—
ZrN	—		15,82	24,69	36,78	44,77	48,66	52,76	–
ZrOj	–	-	13,05	32,30	50,58 .	63,56	70,04	76,07	78,1

См. также табл. 9.11.

Таблица 9.11. Зависимость удельной изобарной теплоемкости Ср, кДж/(кг • К). миака, воды. водяного пара и углекислого газа от давления и температуры

Данные выше жирной горизонтальной черты относятся к жидкой фазе, ниже—к

т. к	Давление, МПа				*т,* К	Давление, МПа			
	0.1	1	10	50		0,1	1	10	50
					Аммиак NHs [42]				
200	4,42	4,42	4,40	4,32	400	2,29	2,45	22,3	4,71
230	4,46	4,46	4,43	4,33	500	2,47	2,53	3,41	6,14
250	*т*	4.51	4.47	4,34	600	2,66	2,69	3,05	4,78
300	2,15	2,94	4,64	4,35	750	2,92	2,94	3,08	3,70

Г. К	*t,* X	Давление, МПа							
		0,1	1	2	5	10	20	50	100
					Вод,а и водяной пар Н^О [43]				
273,15	0	4,217	4,212	4,207	4,196	4,165	4,117	3,993	3,890
323,15	50	4,181	4,179	4,176	4,170	4,158	4,137	4,080	4,038
373,15	100	2:038	4,213	4,211	4.205	4,194	4,173	4,117	4,071
423,15	150	1,979	4,308	4,305	4,296	4,281	4,252	4,178	4,121
473,15	200	1,974		4,494	4,477	4,450	4,402	4,284	4,200
523,15	250	1,988	2,212		4,854	4,791	4,684	4,463	4,328
573,15	300	2,011	2,141	2,321		5,70	5,33	5,788	4,538
623,15	350	2,038	2,125	2,235	2.670	4:043	8,10	5,45	4,897
633,15	360	2,044	2,127	2,231	2,625	3,769	11,37	5,64	4,984
643,15	370	2.050	2,128	2,222	2,578	3,546	18,38-	5,84	5,06
653,15	380	2,056	2,127	2,212	2,528	3,356	10,19	6,10	5,18
663,15	390	2,061	2,125	2,202	2,486	3,201	7,65	6,43	5,29
673,15	400	2,068	2,126	2,197	2,451	3,078	6,33	6,81	5,39
723,15	450	2,099	2,141	2,191	2,360	2,726	3,959	9.48	5,94
773,15	500	2,132	2,164	2,201	2,324	2,569	3,257	7,20	6,42
873,15	600	2,200	2,219	2,240	2,311	2,445	2,770	4,082	5,01
973,15	700	2,270	2,283	2,299	2,346	2,429	2,613	3,279	3,881
1073,15	800	2,341	2,352	2,364	2,401	2,465	2,598	3,024	3,415

т. К	Давление, МПа				*т. к*	Давление, МПа			
	0,1	1	10	100		0.1		10	100
					Углекислый газ СОа [44, 45]				
220	**o i ^**	1,820	1,745		350	0,900	0,936	1,930	1,561
240	0,798	**iГоГ^**	1,864	1,466	400	0,941	0,966	1,327	1,530
260	0,814	0,945	2,039	1,609	600	1,077	1,084	1,161	1,422
280	0,832	0,920	2,273	1,648	1000	1,234	1,236	1,254	
300	0,852	0,916	2,977	1,630	1500	1,327	1,328	1,334	

9.4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Б табл. 9.12—9.14 приведены значения теплоемкости различных органических соединений.

Таблица 9.12. Молярная изобарная теплоемкость *Ср*, Дж/(моль · К) органических соединений при температуре 298,15 К Щ

Жидкости и твердые тела — при давлении 0,1013МПа, газы — в состоянии идеального газа (т. е. при предельно низком давлении): г — газ; ж — жидкость; тв — твердый

Вещество, формула, состояние	
Азулен CioHg (г]	128,4
Анилин QH, (ж)	I91
Ацетальдегид CsHiO (г)	56.6
Ацетон C3HeO (ж)	125
Ацетон C3HeO (г)	74,9
Бензол QHe (ж)	136,1
Бензол CeHg (г)	81.7
Бромбензол CeHjBr (ж)	155,4
Бромметан CHgBr (г) [2]	42.4
1.3-Бутадиен C4Hg (г)	79.5
Бутан C4H10 (г)	98.7
1-Бутанол C4H10O (ж)	179
1-Бутен, C4H8 (г)	89.3
Бутилбензол C10H14 (ж) [21]	175
1-Бутин C4H6 (г)	81.4
2-Бутин C4H6 (ж)	125,1
2-Бутин C4He (г)	78,0
Гексан C6H14 (ж)	195
Гексан (г) C6H14 (г)	146,7
Гексанол CeHj^O (ж)	238
Гексахлорбензол Cede (ж)	201,4
1-Гексен CeHn (ж)	183.3
1-Гек-сен CgHia (г)	138.4
!-Гексин CeHщ (г)	130.5
Гептан C,Hi4 (ж)	224,7
Гептан C,Hi4 (г)	170,7
Глицерин C3HвO3 (ж) [21]	217
Глицин C2H5O2N (кр)	100.3
Декан CioH„,2 (ж)	314.5
Декан C10H22 (Г)	243.1
Дибромметан CHgBr, (ж) [2, 4]	127.4
Дибромметан CH^Brj (г) [2,4]	54.5
1,2-Дибромэтан C2H4BГ,	136,0
2,2-Диметилпропан CsHi, (г)	121.6
1.4-Диоксан C4HeO„ (ж) [33]	152,9
Дифюрбромметан CHF^Br (г) 12]	58.8
Дифтордибромметан CF^Br» (г)	77,0
Дифтордихлорметан CFgCL (г)	72,3
Дифторметан CHgFa (г) [2]	42.9
Дифторхлорброммеган CFgClBr (г	74.6
Дифторхлорметан CHFi-Cl (г) [2]	55.8
Дихлорметан CHjClg (ж) [2, 4]	100
То же (г)	50.9
М-Дихлорэтан C2H4C!2 (ж)	126,3
1,1-Дихлорэтан C2H4C1г (г)	76,2
1,1-Дихлорэтен C2H2Cl2 (ж)	111,3
1,1-Дихлорэтен QHsCU (г)	67.0
Дифен иловый эфир CxaHщO, (тв)	216,6
Диэтиловый эфир C,H6O (г)	65,9
Иодметан **CH3I** (ж) [2, 4]	127.2
Иодметан **CH3I** (г) [2, 4]	44.1
Кетен C2H2O (г)	47,9
ор/по-Ксилол CgHio (ж) [21]	183
Кумол (Ж) [21]	

Вещество, формула, состояние	
Кумол CsHi2 (г) [21]	
Метан*! [2] CH4 (г) [21]	
Метанол **CH4O** (ж) [2, 4]	
Метанол **CH4O** (г) [2, 4]	
Метантиоль CH4S (г)	
Метиламин CH5N (г)	
2-Метил-1,3-бутадиен CsHg (ж)	
То же (г)	
2-Метилбутан CsH^ (ж)	
То же (г)	
2-Метил-1-бутен CбH^ (ж)	
То же (г)	
3-Метил-1-бутин CjHg (г)	
2-Метиопропан C4H10 (г)	
2-Метил-1-пропен C4H8 (г)	
Метилциклопентан CбH12 (ж)	
То же (г)	
Муравьиная кислота CH2O2 (ж) [2, 4]	
То же (г)	
Нафталин CщHв (тв)	
Нафталин CщHe (г)	
Нонан CвHго (ж)	
Нонан CgHso (г)	
Октан CgHis (ж)	
Октан CgHie (г)	
1-Октен CsHie (ж)	
1-Октен CgHie (г)	
Пентан C5H12 (ж)	
Пентан C5H12 (г)	
1-Пентанол C5H12O (ж)	
1-Пентен CaHщ (ж)	
1-Пентен C5H10 (г)	
1-Пентин CsHg (г)	
Пропадиен **C3H4** (г)	
Пропан*! CgHg (г)	
1-Пропанол C3HвO	
Пропен C3He (г)	
Пронин **C3H4** (г)	
Стирол CgHg (ж)	
Стирол CgHg (г)	
Тетрабромметан CBГ4 (тв)	
То же (г)	
Тетрафторметан CF4 (г)	
Толуол C,H8 (ж) [4, 21]	
Толуол C,Hj (г) [4, 21]	
Трибромметан CHBrз (ж)	
То же (г)	
2,2,4-Триметилпентан CgHig (ж)	
Трифторбромметан CF3Br (г) |21]	
Трифторметан*! **CHF3** (г)	
Трифторхлорметан **CF3Cl** (г)	
Трифторхлорэтан C2H2F3Cl (г) [2]	
Трихлорметан **CHCl3** (ж) [2, 4]	
То же (г)	
1,2,2-Трифтор-1,1,2-трихлорэтан C2F3Cl3 (ж)	
То же (г)	
Углерод четыреххлористый CCl.i (ж)	
То же (г)	
Уксусная кислота, мономер C2H4O2 (ж)	
То же (г)	
Фенол CeH.O (тв)	
Формальдегид CH^O (г) [2]	
Фосген C0C]2 (г) [2]	
Фторбензол CgHaF (ж)	
То же (г)	

Продолжение табл. 10.11

Фторбромметан CH_2FBr (г) [2]	49.1
Фтордихлорметан CHFCla (г)	61,0
Фторметан CHgF (г) [2]	37.5
Фтортрибромметан CFBr., (г) [2]	84.2
Фтортрихлорметан **CFCl3** (г)	78,1
Фторхлорметак CH^FCl (г)	47.0
Фторэтан CHjF	58.6
Фураи $C4H_4O$ (ж)	114,6
То же (г)	65.4
Хлорбензол CeHgCl (ж)	150.1
То же (г)	**97.1**
Хлорме1ан **CH3Cl** (г)	40.7
2-Хлорпропан C3H,C1 (г)	87.6
Хлорэтан C2H5Cl (г)	62.3
Хлорэтен C2H3Cl (г)	53.7
Циклобутан C4H8 (г)	72.2
Циклобутен C,He (г) [33]	67,1
Циклогексан C^Hio (ж)	156,5
То же (г)	106.3
Циклогекеен CeHщ (ж)	140.2
То же (г)	105.0
Циклопентан C5H10 (ж)	126, 8
То же (г)	82,9
Циклопентен CsHg (ж)	122.4
То же (г)	75,1
Циклопропан C3H5 (г)	55,9
Этан* C,He (Г)	52.5
Этанол е л о (ж) [2,41	111,4
То же (г)	65.8
Этантиоль CjHeS (ж)	117,8
То же (г)	72,7
Этен* C2H4 (г) [2]	42.9
Этилацетат Q^HgOj (ж)	170
Этилбензол CgHio (ж)	186
То же (г)	128
Этилена оксид C,H40 (г)	48,5
Этиленгликоль CrH^Or (Ж)	151
Этин C^H, (Г) [21	44,0

• См. также табл. 9-14.

Таблица 9.13. Молярная изобарная теплоемкость Ср, Дж/(моль К), органических соединений при температуре от 20 до 1500 К [33]

Верхняя шкала температур относится к конденсированному состоянию, нижняя —к газу (г — газ; к — конденсат)

Вещество и состояние	Температура, К			
	к: 20	40	80	ISO
	г: 400	600	1000	1500
Азулен (г)	176,4	248,2	327,4	
Ацетальдегид (г)	65,81	85,86	112,8	
Ацетон (к)	10,3	30,2	56,8	83,2
Ацетон (г)	92,05	122,8	163,8	191,3
Бензойная кислота (к) [61]	11,24	32,18	56,77	84,14
Бензол (к)	8,37	26,53	44,93	64,64
Бензол (г)	111,9	157,9	209,9	241,3
Бромметан (к)	10,71	26,24	45,15	56,23

Продолжение табл. 10.11

Вещество и состояние	Температура. К			
	к: 20	ш	80	150
	г: 400	600	1000	1500
Бромметан (г)	49,92	62,63	79,50	91,25
Бутан (к)	4,52	27,45	55,65	115,1
Бутан (г)	124,7	169,1	226,8	265,7
1-Бутен (к)	8,21	28,48	53,89	105,4
1-Бутен (г)	112,7	149,9	197,7	229,8
Гексан (к)	10,84	34,64	70,08	109,0
Гексан (г)	184,3	248,4	330,3	385,0
Диметиловыи эфир (к)	**8,20**	24,89	47,91	98,91
Дифтордибромметан (г)	**85,60**	95,35	102,8	
Дифтордихлорметан (г)	98,66	112,0	123,4	128,3
Дихлорэтан (к)	12,26	32,55	54,02	91,21
Дихлорэтан (г)	92,22	**112,4**	138,3	155,3
Кетен (к)	56,15	**69,58**	83,81	93,93
орто-Ксилол (к)	11,00	31,80	60,38	96,06
ODmo-Ксилсл (г)	171,7	234,2	311,1	359,5
Метан* (к) [33, 47]		28,66	40,58	
Метан* (г) [33, 47]	40,6	52,49	72,80	86,7
Метанол	5,86	18,33	37,66	55,65
Метанол (г)	51,42	67,03	89,45	
Муравьиная кислота (к)	4,10	14,16	29,43	44,14
То же (г)	56,96	69,66	89,68	94,27
Нафталин (к)	9,37	**30,12**	51,99	81,75
Нафталин (г)	180,7	**250,8**	328,8	374,4
Пентан (к)	10,25	31,00	62,84	140,6
Пентан (г)	154,4	208,7	278,5	325,3
1-Пентен (к)	10,54	32,93	61,92	129,2
1-Пентен (г)	**143,1**	189,8	249,4	289,4
Пропан* (к) [33, 48]	**6,66**	25,08	50,38	**89,03**
Пропан (г) [33, 48]	94,0	129,2	175,0	**206,1**
Пропей (к)	9,58	28,95	53,51	87.11,
Птепен (г)	79,91	107,5	144,2	Г69,0
2-Пропанол (к)	8,41	24,7	46,1	74,1
Стирол (к)	11,71	32,28	56,19	90,75
Стирол (г)	160.3	218,2	284,2	324,6
Тетрафторметан (к)	20,29	42,80	67,36	
То же (г)	72,63	87,03	98,95	
Толуол (г)	**139,1**	194,9	260,2	300,3
Трифторметан* (г)	**61,04**	75,86	90,92	
Трифторхлорметан (г)	77,59	90,37	100,5	104,5
Уксусная кислота (к)	–			59,5
То же (г)	81,67	105,2	133,8	152,5
Формальдегид (г)	39,19	48,10	61,90	71,10
Фтордихлорметан (г;	70,08	82,47	94,22	100,5
Фтормеган (г)	44,02	57,74	77,11	90,21
Фтордихлорметан (к)	21,40	40,05	55,35	83,89
То же (г)	87,04	96,66	103,4	105,9
Хлорметан (к)	6,28	22,51	42,38	62,34
То же (г)	48,12	61,25	78,91	91,00
Четыреххлористый углерод (к)	21,33	40,92	58,91	84,89
То же (г)	91,71	99,66	104,8	
Этан* (к) [33, 49]	6,42	24,87	53,22	71,0
Этан* (г) [33, 49]	65,65	89,3	122,7	146,0
Этанол кристалл1че-ский (к)	7,155	17,25	40,80	
Этанол аморфный (к)	8,290	24,07	46,38	
Этанол (г)	87,56	112,2	145,0	167,7
Этен* (к)	6,36	23,70	48,33	66.78
Этен (г)	53,12	71 .55	94,43	110,29
Этин (г)	50,10	57.44	66,62	74,07

Таблица 9.14. Зависимость удельной изобарной теплоемкости Ср, кДж/(кг • К), органических жидкостей и газов от давления и температуры

Данные выше жирной горизонтальной черты относятся к жидкой фазе

г, к	Давление, МПа				т. к	Давление, МПа			
	0,1	1	10	20		0.1	•	10	20
			Дифто) ч>хлорметий (фреон-22) CHF^Cl [45]						
273,15		1,161	1,125	1,105	403,15	0,768	0,807	2,169	1,334
303,15	**0**.657		1,166	1,114	453,15	0,813	0,830	1,422	1,465
353,15	0,720	0,804	1,378	1,225	473,15	0,830	0,841	1,228	1,454

Продолжение

7, К	Давление, МПа				Г, к	Давление, МПа			
	0,1	•	10	100		0,1	1	10	100
			Метан CH, [47]						
100	3,258	3,255	3,226	—	200	2,106	2,294	5,321	2,962
ПО	3,390	3,379	3,289	–	300	2,236	2,290	3,018	3,047
120		3,549	3,431	3,046	400	2,534	2,559	2,808	3,149
130	2,163	3,683	3,523	3,202	600	3,273	3,282	3,367	3,612
140	2,141	3,822	3,580	3,230	800	3,959	3,964	4,006	4,175
150	2,125	2 ^ ^	3,644	3,187	1000	4.539	4,542	4,568	4,691

Продолжение

г, К	Давление, МПа					Давление, МПа			
	0,1013	1	10	70		0,1013		10	70
						Пропан CgHg [48]			
90	1,911	1,911	1,908	—	300	1,696	2,751	2,556	2,317
100	1,923	1,922	1,919	1,903	350	1,916	2Т0^	3,012	2,544
150	1,998	1,997	1,988	1,953	400	2,136	2,209	3,915	2,795
200	2,125	2,122	2,099	2,028	500	2,552	2,586	3,238	3,052
250	Т Т ^	2,336	2,277	2,145	700	3,239	3,252	3,394	3,573

Продолжение

т, к	Давление, МПа				Т. к	Давление, МПа			
	0,1	1	10	»		0.1	•	10	20
						Трифторметан (фреон-23) CHFg [46]			
233,15	оГбб3	0,824	0,727	0,661	353,15	0,812	0,856	1,973	1,581
253,15	0,683	оТёШ	1,195	1,112	403,15	0,879	0,904	1.298	1,510
303,15	0,745	0,828	1,796	1,421	453,15	0,940	0,956	**1,162**	1,343

Продолжение табл. 10.11

Т, К	Давление, МПа				Т, К	Давление, МПа			
	0.1	1	10	70		0,1	>	10	70
					Этан QHe [49]				
120	2,296	2,293	2,274	2,250	220	1,511	2,607	2,500	2,301
140	2,356	2,354	2,335	2,277	240	1,561	2,834	2,633	2,360
160	2,362	2,359	2,332	2,222	300	1,765	Г ^	3,457	2,527
1-80	2,392	2,387	2,347	2,205	400	2,182	2,227	3,211	2,838
200	1,476	2,467	2,404	2,243	500	2,597	2,620	2,914	3 136

Продолжение

т. К	Давление, МПа				*Г.* к	Давление, МПа			
	0.1		10	100		0.1	1	Ю	100
					Этилен CsHi [50]				
130	2,400	2,398	2,382	2,354	300	1,544	1,639	4,299	2,279
150	2,381	2,379	2,346	2,186	350	1,716	1,767	3,308	2,367
200	1,321	2,529	2,424	2,190	400	1,894	1,927	2,510	2,456
250	1,397	***ГШ***	2.773	2,209	450	2,067	2,091	2,414	2,547

9.5. ТЕПЛОЕМКОСТЬ РАСТВОРОВ, СМЕСЕЙ, СПЛАВОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В табл. 9.15—9.20 и на рис. 9.11, 9.12 приведены значения удельной теплоемкости для различных сплавов и технических материалов.

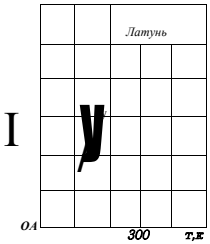


Рис. 9.11. Удельная изобарная теплоемкость Р-латуни (массовые доли Си — 51,8%, 2и —. 48,2%) вблизи точки упорядочения [4]

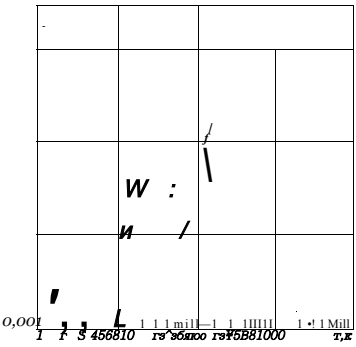


Рис. 9.12. Удельная теплоемкость некоторых сталей, сплавов и графита:
/ - припой (РЬ-50%: Sn-50%): [5]; 2 - сплав Вуда [5, 33]; 3 — латунь Л-62 [5]; ^ — графит [5, 13, 68]; 5 — СТ-45 [13]; 6 — СТ-Х18Н9Т. СТ-Х18Н10Т; 7- конСтан«и [5, 33]; 8 - ыо - иель [5, 33]

Таблица 9.15. Зависимость удельной изобарной теплоемкости Ср, кДж/(кг • К), воздуха от давления и температуры [56, 57]

Т. К	Давление, МПа				Т. К	Давление, МПа			
	0,1		10	100		0,1	1	10	100
110	1,028	1,495	2,011	1,683	400	1,014	1,022	1,089	1,244
120	1,020	1,280	2,114	1,704	600	1,052	1,054	1,080	1,17.6
150	1,011	1,107	2,847	1,575	1000	1,141	1,142	1,150	1,191
200	1,007	1,048	1,641	1,433	1500	1,211	1,212	1,214	1,233
300	1,007	1,021	1,163	1,331	2000	–	–	1,252	1,261

Таблица 9.16. Удельная теплоемкость Ср, кДж/(кг К), углеродистых сталей и чугуна при различной температуре *Т*, К

Марка стали и чугуна		
Ст 08	1173	0,65
То же	1573	0,66
Ст 20	300	0,461
То же	1000	0,673
Ст 35	300	0,462
То же	1000	0,564
Ст У8	300	0,462
То же	1200	0,662
	• 80	0,358
Сталь листовая электротехническая	150	
	,250	о! 426
Чугун белый	293	0,540
Чугун СЧ 10	293	0,500

Таблица 9.17. Удельная теплоемкость Ср, кДж/(кг К), легированных сталей при различной температуре *Т*, К

Марка стали	*Т*		Литература
15Л, 25Л. 45Л, 55Л	/300	0,457	[13
	1800	0,485	13
13Н2ХА	300	0,452	13
То же	1000	0,612	13
Р18	373	0,42	63
То же	973	0,69	63
11Р3АМЗФ2	373	0,43	63
То же	973	1,01	Г63
Р6М5	373	0,44	Г63]
То же	973	0,91	631
4Х13	300	0,485	13
То же	1000	0,598	13
1Х12В2МФ	300	0,485	13
То же	1200	0,620	13
Х5М	300	0,482	[13
То же	1400	0,660	[13
ЗОХМ, ЗОХМА, ЗОХГС, ЗОХГСА	/300	0,461	[13]
	1800	0,49	[13]
1Х11МФ, 1Х12ВИЛ1Ф	300	0,483	[13
То же	800	0,955	
25Х2МФА	300	0,481	[13]
То ие	800	0,506	
ХН35ВТ (ЭИ612, ЭИ612К)	300	0,495	[13]
То же	1000	0,570	
Х17Н13М2Т (ЭИ448)	300	0,510	[13]
То же	1000	0,650	
Х16Н25М6 (ЭИ395)	300	0,490	[13]
То же	600	0,525	

Продолжение табл. 9.17

Марка стали	*т*		Литература
Х22Н26. ВЖЮО	300	0,485	[13]
То же	1000	0,535	
ШХ15	300	0,48—0,53	[5]

Таблица 9.18. Удельная теплоемкость *Ср*, кДж/(кг • К), двухкомпонентных сплавов, не содержащих железа [33], при различной температуре

Вещество	*Т*, к	
67% Al, 33% Си	123	0,42
Тс же	273	0,60
50% Al, 50% Си	123	0^35
То же	273	0,51
33% Al, 67% Си	373	0,46
То же	773	0,53
25% Al, 75% Си	123	0,31
То же	273	0,43
92% Al, 8% Mg	293	1,15
32% Al, 68 %V	288—373	0,66
60% Al, 40% Zn	293—373	0,56
80% Аи, 20% Си	137	0,164
То же	285	0,183
55,5% Bi, 44,5% Pb [13]	403	0,147
	973	0,147
50% Bi, 50% Sn	273—373	0,182
25% Bi, 75% Sn	273—373	0,209
32% Cd, 68% Sn	196—293	0,232
67% Си, 33% Mg	123	0,30
	673	0,57
33% Си, 67% Mg	123	0,44
То же	273	0,61
68% Си, 32% Mg	137	0,35
То же	285	0,41
90% Си, 10% Ni	137	0,31
То же	285	0,38
10% 1г, 90% Pt	293—373	0,135
78% К, 22% Na (ж) [13]	300	0,971
То же	600	0,879
»	1000	0,888
44% К, 56% Na (ж) [13]	300	1,16
То же	600	1,06
»	1000	1,05
90% Мп, 10% Ni	137	
То же	285	0,'46
55% Мп, 45% Ni	137	0,39
То же	285	0,46
36% РЬ, 64%Т1	273-298	0,128

Таблица 9.19. Удельная теплоемкость Св, кДж/(кг К), многокомпонентных сплавов при различной температуре *Т*, К

Вещество	*т*		Литература
50% Bi, 31 "i Pb, 19% Sn	273	0,138	13
48% Bi, 26%Pb, 13%Cd	273	0,130	33
Алюмель	273	0,52	33
ЛипоБИца сплав	278—423	0,144	331
То же	373—423	0,178	[33]
Нихром	293	0,46	[5]
Розе сплав	196-293	0,147	[33]
То же	293—362	0,23	[33]

1блица 9 20. Удельная теплоемкость с^, кДж/(кг-К), неметаллических технических материалов при различной температуре *Т*, К

	т	′р	Литература
Огнеупоры			
Алундум	373	0,78	[33]
Глинозем	373	0,84	33
	1773	1,15	[33]
Карборунд	273	0,93	13
	1273	1,06	13
Кирпич динасовый	273	0,90	13
То же	1273	1,16	13
Кирпич магнезитовый	273	1,05	13
То же	1273	1,32	13
Кирпич хромитовый	273	0,90	13
То же	1273	1,17	[13
Кирпич шамотный	273	0,88	[13
То же	1273	1,14	[13
Силлиманит	273	0,90	[13
	1273	1,16	[13
Уголь электродный	300-350	0,70	[33
То же	300—810	0,83	[33
	300-1723	1,62	33
г высоковольтный	300	0,75	13
Фарфор низковольтный	300	0,85	13
Фарфор установочный	300	0,92	13
Циркон	273	0,55	13
	1273	0,68	13
Пластические вещества, полимеры, резнна			
Бакелит	300	0,82	[5]
Винипласт	293	1.0	[331
Капрон	293	2,3	33]
Найлон-6	100	0,6	5]
	200	1,0	5]
	300	1,5	51
	253-276	1,6	33]
Парафин жидкий	333	3,0	33]
Поликарбонат	100	0,43	5
	300	1,21	5
Полиметилакрилат (плексиглас, оргстекло)	100	0,55	5
	200	1,05	5
То же	300	1,50	5
Полистирол ячеистый ПС-1	100	0,44	[5
То же	300	0,34	[5
Политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон)	5	0,006	5
	20	0,08	5
То же	50	0,21	5
	100	0,39	5

Продолжение табл. 10.11

Вещество	*т*	"р	Литература
Политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон)	200	0,70	[5]
То же	300	1,16	[5]
Полихлортрифторэтилен	293	0,92	[331
Полиэтилен	100	0,62	33]
»	293	2.5	33
Полиэфирные пластмассы	293	1-2,3	[33
Пресс-материал АГ-4С	293	1,17	
Резина	300	1,9	11
Эбонит	293	1,43	[331
Этролы целлюлозные		1,6	[33]
Природные вещества. минералы			
Андалузит	273-373	0,70	[33]
Апатит	288—372	0,79	[33]
Асбест	293	1.1	[5]
Аугит	293—371	0,81	[33]
Берилл	323	0,84	[33]
Боракс	308	0,67	[331
Базальт	273	0,85	[33
»	1473	1,49	33
Гипс	73	0,32	33
»	273	1,06	33
Гнейс	273	0,74	33
	473	1,02	33
Гранит	273	0,65	[33
»	1073	1,30	[33
Графит природный	300	0,95—1,05	5]
Грунт	300	0,85	13]
Грунт лунный из Моря изобилия	300	0,74	5]
Доломит	293—372	0,93	[33
Каолин	273	1,0	[33
»	673	1.35	[33
Лава вулканическая	296-373	0,84	[33
	304—1049	1,09	[33
Малахит	288—372	0,74	[33
Слюда	293	0,88	[33
Тальк	332	0,87	33
Шпинель	282—371	0,81	[33
Шеелит	323	0,4	[33]
Стекла			
Стекло кварцевое	293	0,89	[33
То же	873	1,00	[33
	1473^	1,14	33
Стекло крон	283—288	0.67	33
Стекло натриевое	293—373	0,803	33
То же	293—1273	1,125	33
Стекло оконное	273—373	0,67	[33!
Стекло пирекс	173—273	0,604	33
То же	273—573	0,859	33
	313—1273	1,20	33
Стекло термометрическое 16"	292—373	0,832	33
Стекло флинт	283—323	0,49	[33]
Стекла из природных силикатов			
Анорит Ca0-Al203-2Si0^	273—373	0,787	[331
	273—973	1,007	33]
Альбит Na20-Al203-6Si02	273—373	0,827	33]
	273—1173	1,104	[33]

Продолжение табл. 10.11

Вещество	T		Литература
Волластонит CaO-SiOa	273-373	0.775	[33]
»	273—973	0,985	[33
Диопсид CaO-MgO-25102	273-373	0,811	33
»	273—973	1,020	33
Микроклин KgO-AlgOs X X 6Si02	273-373	0,803	33
	273—1373	1,087	[33]
Строительные материалы			
Асфальт	298	1,68	13
Бетон	298	0,84	13
Бумага, картон	298	1,51	13
Войлок	298	1,88	13
Глина	273	0,75	33
»	673	1,13	33
у)	1073	1,51	33
Гранит	298	0,92	13
Грунт	298	0,84	13
Дерево	298	1,2	[33]
Зола	298	0,75	113
Известняк	273-373	0,92	[33]
Камень строительный	298	0,92	33
Кирпич красный	298	0,88	13
Кирпич силикатный	298	0,84	13
Мел	298	0 88	[33
Мрамор	298	0,'92	[13]
Песок речной	298	0,84	[13]
Пробка	273—373	1.8	[33]

Продолжение табл. 10.11

Вещество	T		Литература
Стекло	298	0,84	[131
Текстолит	298	1,5	33
Торфяная засыпка	298	1,7	13
Фанера	273	2,5	33
Цементно-песчаный раствор	298	0,84	13
Шлак котельный	298	0,75	[13]
Топлива и масла			
Бензин Б-70	293	2,06	21
Бен^ин Б-70	423	2,74	21
Бензин Б-70, пары	403	2,28	21
То же	523	2,58	21
Глицерин	293	2,35	[21
»	513	3,60	[21
Керосин Т-1	293	2,00	[21]
То же	423	2,63	[21]
Керосин Т-1, пары	423	2,37	[21
То же	473	2,47	211
Мазут	293	2,18	13
Масло ВМ-4	243	1,44	21
То же	373	1,62	21
Масло МС-20	273	1,98	[21
То же	423	2,44	21
Масло трансформаторное	223	1,70	[21
То же	373	2,04	121
Масла растительные	293	1,5—2,0	[33]
Нефть	293—333	2,10	[33]
Уголь каменный	293—1313	1,31	[33]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термические константы веществ: Справочник/Под ред. В. П. Глушко. М.: ВИНИТИ. 1965—1981. Вып. 1-10.

2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание/Под ред. В. П. Глушко. — 3-е изд. М.: Наука, 1977—1982. Т. 1—4,

3. Selected values of the thermodynamic properties of the elements/R. Hultgren, R. D. Decai, D. T. Hawkins, M. Gieiser, K- K. Kelley, D. D. Wagman. Metals Park (Ohio). Amer. Soc. for Metals. 1973,

4. Landolt H., Bornstein R. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. Bd 2. T- 4—6 Aufl. Berlin: Springer, 1960.

5. Кожевников И. Г., Новицкий Л. А. Теплофизические свойства материалов при иизких температурах: Справочник. — 2-е изд. М.. Машиностроение, 1982.

6. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного азота при температурах 70—1500 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГССД 4—78. М.: Изд-во стандартов, 1978.

7. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона/В.А. Рабинович, А. А. Вассерман, В. И. Недоступ, Л. С. Векслер. М.: Изд-во стандартов, 1976.

8. JVlcCarty R. D., Hord J., Roder H. H. Selected properties of hydrogen. Washington; Govern, print, off. 1983.

9. Теплофизические свойства щелочных металлов/ Э. Э. Шпильрайн, К. А. Якимович, Е. Е. Тонкий и др./ Под ред. В. А. Кириллина. М.: Изд-во стандартов, 1970.

10. Кислород жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 70—1000 К и давлениях 0,1-100 МПа. ГССД 19—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

11. Медь. Изобарная теплоемкость в диапазоне температур 4—273,15 К. ГССД 21—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

12. Справочник по физико-техническим основам криогеники/М. П. Малков, И. Б. Данилов, А. Г. Зельдович, А. Б Фрадков/Под ред. М. П. Малкова. — 3-е изд. М.-Энергоатомиздат, 1985.

13. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник М.: Атомиздат, 1978.

14. Березовский Г. А., Пауков И. Е.//Журн. физ. хим. 1978. Т. 52. № 10. С. 2677- 2679.

15. Selected values of the thermodynamic properties of binary alloys/R. Hultgren, R .D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gieiser, K. K. Kelfey. Metals Park (Ohio)//Amer. Soc. of Metals. 1973.

16. Angus S., Reuck K. M., McCarty R. D. International thermodynamic tables of the fluid state — 4. Helium. Oxford: Pergamon Press, 1977.

17. Cetas T. C., Holste J. C., Swenson C. A //Phys-Rev. 1969. Vol. 182. N 3 P. 679—685.

18. Holste J. C., Cetas T. C., Swenson C. A.//Rev. Sci. Instrum. 1972. Vol. 43. N 4. P. 670-676.

19. Leopold H. A., Boorse H. A.//Phys. Rev. 1964. Vol. 134. N 5A. P. 1322—1328.

20. neighbor J. E.//Ibid. 1967. Vol. 155. N 2. P. 384—387.

21 Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. М.: Наука, 1972.

22. Стюарт//Приборы для научных исследований. 1983. № 1. С. 3—15.

23. Bagatskii M. I., Kucheryany V. A., Manzhelii V. G., Popov V. A.//Phys. Stat. Sol. 1968. Vol. 26. № 2. P. 453—460.

24. Radebaugh R., Keesom H.//Phys. Rev. 1966. Vol. 149. № 1. P. 209—216.

25. Holste J. C.//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 6 № 6. P. 2495-2497.

26. Ahlers G.//Phys. Rev. A. 1970. Vol. 2. № 4. P. 1505-1526.

27. Mertig M., Pompe G., Hegenbarth E.//Solid State Comm. 1984. Vol. 49. № 3. P. 369—372.

28. Кострюкова М. О., Стрелков П. Г.//Докл. АН СССР. 1965. Т. 162. № 3. С. 543-^545.

29. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. 1. М.: Мир, 1979.

30. Uopold H. Д., lafrate G. J., Rothwarf F. e. a.// J. of Low Temperature Phys. 1977. Vol. 28. № 3/4. P. 241-261.

31. Hell R. W., Cesler P., Hukln D. A.//J. Phys. F.: Metal Phys. 1984. Vol. 14. № 5. P. 1265—1276.

32. Жирифалько Л. Статистическая физика твердого тела. М.. Мир, 1975.

33. Таблицы физических величии: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

34. Junod Д., Staudeman J.-L., Muller J., Spitzli P.// J. Low Temperature. Phys. 1971. Vol. 5. № 1. P. 25—43

35. Гельд П. В., Калишевич Г. И., Суриков В. И. и др.//Докл. АН СССР 1974. Т. 215. № 4. С. 833—835.

36. Vieland L. J., Wicklund Д. W.///Phys. Rev. 1968. Vol. 166, № 2. P. 424—431.

37. Sandine T. R.. Keesom P. H.//Ibid. 1969. Vol. 177. № 3. P. 1370—1383.

38. Wiswanathan R.//J. Appl. Phys. 1975. VoL 46. № 9. P. 4086—4087.

39. Knapp G. S., Bader S. D., Fisk Z.//Phys. Rev. B, 1976. Vol. 13. № 9. P. 3783—3789.

40. Knapp G. S., Bader S. D., Culbere H. V. e. a.//Ibid. 1975. Vol. 11. № 11. P. 4331—4338.

41. Суриков В. И., Калишевич Г. И., Гельд П. В.// Журн. физ. хим. 1975. Т. 49. № 2. С. 555—556.

42. Теплофизические свойства аммиака//И. Ф. Голубев, В. П. Кияшева, И. И. Перельштейн, Е. Б. Парушин 11 др. М.: Изд-во стандартов, 1978.

43. Ривкин С. Л., Александров Д. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980.

44. US NBS Circular 564 Properties of Gases. Washington: US Gov. Print. Off., 1955.

45. Angus S., Armstrong B., de Reuk K. M.//International thermodynamic tables of fluid state — 3. Carbon dioxide. Oxford: Pergamon Press, 1976.

46. Теплофизические свойства фреонов. Справочные данные, т 1. Фреоны метанового ряда/В. В. Алтуини, В. 3. Геллер, Е. К. Петров и др. М.: ИЗД-DO стандартов, 1980.

47. Метай жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 100-1000 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 18-81. М.: Изд-во стандартов, 1981.

48. Goodwin R. D., Haynes W. H. US NBS monograph. 170. Thermophysical properties of propane from 85 to 700 K at pressures to 79 MPa. Washington: US Gov. Print. Off. 1982.

49. Этан жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 100—500 К и давлениях 0,1—70 МПА. ГСССД 48—83. М.: Изд-во стандартов, 1983.

50. Этилен жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 130—450 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 47—83. М.: Изд-во стандартов, 1983.

51. Пешков В. П.//Успехи физ. наук. 1968. Т. 94. Вып. 4. С. 607—640.

52. Физико-механиические и теплофизические свойства металлов/Под ред. Н. Н. Рыкалина. М.: Наука, 1976.

53. Крафтмахер Я. Д., Романишиина Т. Ю.//Физика твердого тела. 1966. Т. 8. № 6. С. 1966—1967.

54. Новиков И. И., Рощупкин В. В., 1«озговой Д. Г., Семашко Н. Д.//Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. № 5. С. 858—962.

55. Fereira da Silva D., Burgemeister E. Д., Dokoupil Z.//Phys. Lett. 1967. Vol. 25A. № 5. P. 354—356.

56. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного воздуха при температурах 70—1500 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 8—79. М.: Изд-во стандартов, 1980.

57. Таблицы рекомендованных справочных данных. Воздух. Плотность, сжимаемость, энтальпия, энтропия, изохориая и изобарная теплоемкости, скорость звука и показатель адиабаты при температурах 1300—2000 К и давлениях от 5 до 100 МПа. ГСССД Р. 32—81.

58. Графит УПВ-1Т. Энтальпия и теплоемкость в диапазоне температур 1200—2900 К. ГСССД 25—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

59. Selected values of chemical thermodynamic properties/F. D. Rossini, D. D. Wagman, W. H. Evans, S. Levine, L Jaffe. US Cov. Print. Off. 1952.

60. Selected values of chemical thermodynamic properties/D. D. Wagman, W. H. Evans, V. B. Parker, J. Hallow, S. M. Baily, R. H. Schumm. Washington: US Gov. Print. Off. 1965—1973.

61. Бензойная кислота. Изобарная теплоемкость в диапазоне температур 4—^73,15 К. ГСССД 20—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

62. Стали 12Х18Н9Т и 12Х18Н10Т Удельная энтальпия и удельная теплоемкость в диапазоне температур 400—1380 К при атмосферном давлении. ГСССД 32—82. М.: Изд-во стандартов, 1983.

63. Сталь инструментальная быстрорежущая. Физические свойства. ГСССД 27—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

ГЛАВА to
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ

Э. Б. Гельман

10.1. ВВЕДЕНИЕ

Температурным расширением называется эффект изменения размеров тела с изменением температуры при постоянном давлении. Это явление обусловлено несимметричностью потенциала взаимодействия атомов вещества в решетке, что приводит к ангармонизму колебаний атомов относительно среднего положения.

Температурным коэффициентом объемного расширения р называется относительное изменение объема *V* при нагревании тела на одни Кельвин

$$\alpha_V = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

Для анизотропных веществ температурное расширение характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) а, который определяется как

$$\alpha_l = \frac{1}{l}\left(\frac{\partial l}{\partial T}\right)_p$$

где l — размер тела в данном направлении.

В общем случае ***а*** — симметричный тензор второго ранга а=[ш/]. Если [а,-,] привести к главным осям симметрии, то он будет полиостью определяться главными значениями ТКЛР oi, as, Оз, так что шар, выделенный в веществе, при нагревании на А7" преобразуется при ***АТ***—>-0 в эллипсоид с осями, пропорциональными 1-faiAT, l+OsAT, l-t-азДГ, причем р=а,+02+03. Для кубической сингонии а||=«22=взз=а и теизор вырождается в скаляр. Для гексагональной (тригональной) сингоний $a_{\parallel}=a_{22}=a_{\pm}$. «33=0 ||, где индекс || обозначает направление оси шестого (третьего) порядка, а ± — направление, перпендикулярное этой оси.. Для ромбической сингонии необходимо зиать ТКЛР в направлениях осей второго порядка; в кристаллах моноклинной и триклинной сиигоний главные оси не определяются однозначно кристаллографической системой координат и зависят от температуры, поэтому температурное расширение таких структур описывают посредством ТКЛР $a_{\alpha\beta}$, ***аь,*** Ос в направлении кристаллографических осей координат ***а. Ь, с.***

Помимо коэффициентов а и р, которые называют истинными, для характеристики температурного расширения используют средние температурные коэффициенты расширения, определяемые как средние значения истинных коэффициентов на конечном интервале температуры А7":

$$\alpha_V = \frac{1}{V}\left(\frac{\Delta V}{\Delta T}\right)_p \qquad \alpha_l = \frac{1}{l}\left(\frac{\Delta l}{\Delta T}\right)_p$$

а также (для анизотропных веществ) средний по направлению ТКЛР $\alpha_{ср} = \frac{1}{3}(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3)$. Единица измерения всех температурных коэффициентов расширения К-'.

Существует приближенная феноменологическая связь между теплоемкостью Су вещества при постоянном объеме и его изотермической сжимаемостью кт, описываемая законом Грюнейзена:

$$\alpha_V = \frac{\gamma C_V \chi_T}{V}$$

где ***Р*** — давление; ***у*** — так называемая постоянная Грюнейзена, а также различные эмпирические соотношения, например

$$\alpha_V = \frac{A}{T_{пл}}$$

где Тпл — температура плавления вещества; Л = 7,24- Ю^^ для веществ с металлическим характером связей, ***А*** = = 11,5-10-2 для щелочно-галоидных соединений.

В общем случае а и р зависят от давления, температуры, химического состава, структуры тела и его фазового состояния. Монотонный характер зависимости а(7") нарушается в точках фазового перехода, а также за счет сложения электронного, магнитного и решеточного вкладов в температурное расширение, которые в определенных температурных интервалах могут быть различны.ми по знаку и сравнимыми по значению.

В табл. 10.1—10.12 приведены значения ТКЛР для индивидуальных веществ (элементов и неорганических соединений), а также для технических материалов в твердом состоянии. В табл. 10.13 приведены значения температурного коэффициента объемного расширения некоторых жидкостей и газов.

10.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

10.1. Истинный температурный коэффициент линейного расширения элементов в кристаллическом состоянии «, Ю-" К"' [1]

			Температура, К											
			50	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	дополни-литера-тура
	0,0177	0, 111	3,36	7,94	14,7	17,8	18,9	19,5	20,2	21,0	23,1	25,6	28,1	
		0,051	1 ,04	3,62	12,3	20.2	14,9 (оценка) 23,3	24,5	26,2	28,1	32,6	37,8 (900 К)		[2, 3]
Am (аср)														
АГ (Яср)	5,1	46,2	287	457~	667 /ЯП		7 1 1		g					
	0,073	0,514	10,7	18,7			43,44 (283 К)							[2]
AS (а„)					(85 К) –	–	3,0 (279 К)		–	–	–	–	–	[2]
	0,026	0, 228	4,22	7,65	11,5 —	13,3 —	14,0 8 (273 К)	14,5	15,0 —	15,5 8,3 (boo	16,5	17,7 —	19,1 —	[2]
Аи	0,200	1,73	10,55	13,7	17,10 (85 К)		16,4	20,5	24,6	–	-	-	–	[2]
Be (а„)					0,66 1,48	5,25 7,89	9,20 12,4	11,5 14,9	12,9 16,9	14,0 18,3	15,9 20,2	17,6 21,4	19,5 23.4	
Bi (а,,)	0, 26	2,07	13,1	16,0	16,85	17,1	17,2	17,4	17,5	–	–	–	–	–
(V)	0,026	0,20	3,20	6,84	9,96	11,2	11,7	11,8	11,9	—	—	-	–	–
Br (a j				–	–	133,1	—	—	-	—	—	—	-	—
(Ч) i^c)						86,44 29 ,'55		–		–		–		
С (алмаз)		•10-^	8.10-^ 3,8	0,004 8,7	0,05 17,6	0,45 24,9	1,0 26,7	1,80 27,5	2,53 28,1	3,09 28,5	3,83 28,9	4,32 29,2 (950 К)	4,83	[3] [4]
(графит) (а ц)			-0,09	-0,50	-1,07	-1,33	-1,22	—0,91	-0,53	-0,18	0,39	0,66 (950 К)		[4]
Ca	0, 010		3,3	9,6	16,8	20,4	22,4	24,1	25,8	27,6	33,6	–	–	[2]
Cd (. „)	0, 28	7,2	50,0	58,9	59,7	56,5	54,0	50,5	43,4	–	–	–	–	
i ^ l)	–0, 01	-1,05	-2,95	2,6	10,6	16,7	19,6	25,8	37,0	–	–	–	–	–
Ce (аср)	-4,0	-8,6	5,0 (15 К)	—	—	—		6,2	6,2	6,2	7,6	9,1 (950 К)		—
Cl («ср)			100 (39 К)		–	—	—	—	—	–		~	-	
Co (аср)	0,014	0,035	0,45	1,93	6,9	11,7	12,2	13,3	14,3	15,1	14,2	15,4 (1100 К)		[5]
Cr (^ср)	-0,14	-0,29	-0,38	0,15	2,25	5,18	5,00	8,3	8,7	9,1	9,9	10,7	11,8	[3]
Cs							97,0	97,0	(370 К)			–	–	
Си	0,009	0, 021	1,00	3,87	10,5	15,2	16,7	17,3	1 17,9	18,6	20,1	21,8	23,8	[2,58,61]
	33,	ай=24,	,=4,7	а 50 К)	3,0	7,3 –	7,9	9,5	1 10,5 = 6,0)	11,1	12,2 –	– —	– —	– —
Dy (яср)		1,5	5,0		7,1	9,0	9,5	9,9	10,3	10,7	11,8	15,2	17,8 <110К)	[6]
ЕГ (Дер)														

Продолжение табл. 10.1

E ' C .)								19,3						
EM . . ,)			0,040	**0,22**	1,00	5,09	9,96	34,2 12, 0	25,7 13,2	**20,2** 14,4	19.4 15.5	16,5	14,7	22,5
Fr								102						
o . Kj,,						15,7	18, 8	(оценка! 20,7						
Gd	(acp)		- 3			5	6	16,2 6 , 3	**(aft= 11. 1,**		8,3	9,2	**11, 2**	17,6
Ge			0,0045	- 0 , 0 7 1	**0, 12**	2,29	4,93	5,82	**6,6 6,28**	6,71	7,12	7,83	8,73 (1100 K)	
Ha			4800 (в тройной точке, 13,96 K)											
Hf	(acp)								6,7	6,9		7,54		
Hg	(acp)					36,9	47,6							
Ho	("II) (, „)			- 1 0 0 (60 K)		42,9 (- 7 0	:34,0)		15,8	**16,8**	17,8	19,9	**22,2** (950 K)	
						32				5,0	5,0	5,4	7,0 (950 K)	
						70								
	(«II)	**-1, 26**	4,01	23,0	23,0	18, 0	5,9	133,4 **-16, 2**	(as = 95, - 4 2 , 0	a, = 35,1)				
		0,99	0,94	7,2 0,93	17.0 **2,0**	**28,0** 4,11	37,9 6,09	53,9 6,40	79,5 6,51	6,73	7,02	7,66	8,72 (1100 K)	
		0,95	6, 01	35,5	49.1	59,5	68,3	79,6						
		8, 1	57	216	**280 .**	430								
	Й	0, 16				3,3 22,5	4,4 39.0	5,0 47,1	5,7			10,3	**12, 1**	
	(=•11)	1,3	2,5	7,4	11,5	17,5	18. 1	**20, 0**	19,1					
		0,3	0,6	**2,0**	3,5	7,3	**6,2**	5,8	5					
	("II)	0,0075	0,03	1,35	5,91	16, 1	23,8							
		0, 011	0,05	1,35	5,34	15,0	22,3							
	(«ср)							25,8	27,3	29,0	31,0	35,0		
a-Mn		—0,14	- 0 T 2 8	- 0 , 9	- 0 , 7	11,9	19,0	**22,8**	25,8	28,4	30,9	35,9		
P-Mn						14,8	21, 6	25,6					43,2	
7-Mp		0,049	0,130	1,40	47O1	8, 10	12,3	15,1					45,2 (1400 K)	
MO		0,007	**0,02**	0,17	0,74	2, 68		5,27	5,45		5,82	6, 20	11,43 (2400 K)	
N,		12,5	30	550	692,0 (44^K)									
Na						45,7	64,7	71,5						
Nb		0,003'	0,04	0,64	2,14	4,84	6,39	7,10		7,50		8,09	10,39 (2400 K)	

в сверхпроводящей фазе при 6 к.

Продолжение табл. 10.1

Элемент		Температура, К											
			10										
Nd	(аср)	**-2,0**	2,9					7,0	7,0	7,2	7,6	8,9	13,4 (1100 К)	
Ne	(аср)	46	337	1723 (23 К)										
Ni		**0,02**	0,05	0,26	,64	6,61	11,4	13,0		14,9	16,9			
Np	(«ср)							27,66			42,7 (700 К)			
O,	(аср)	**200** (21 К)			870 (48 К)									
OS	(а,|)							5,84	6,17	6,55	7,01			
P	(белый)							3,97	4,16	4.42	4,76	5,65		
	(красный)							124,5						
								66,5 (оценка)						
Pa	(а,,)	–							4,4 (а^ | 21,4)			-21,7(а_^=85:	
Pb		0,11 (4 К)	3,02	17,0	21,8	25,4	27,3	28,5	29,63	31,73	33,3 (550 К)			
Pd		0.5 (20 К)		1,12	3,57	7,95	10,84	11,75	12,48		13,90	15,3	17,40 (1100 К)	
Pm								9,0 (оценка)						
Po	(Г)						23(179-^-300 К)							
Pr		–				6,5	5,6	5,0	5,0	5,2	5,7	7,3	(850 К)	
Pt		0.0155	0,071	1,43	3,80	6,77	8,55	8,99		9,46	9,70	10,2	15,6 (2100 К)	
Pu	(«ср)	–					39,5	48,7	41,3 (440 К)		8,61 (650 К)		-16,3 (750 К)	
Ra	(а)								17,1	(300-600 К)				
Rb														
Re	(яср)	0,0053	0,0158	0,31	1,81		4,50	4,70	зТ95		1 зТ83	3,58	3,33	
	(^11)	–						6,25	(а^ =7,0 | 293 — 1200 К)				
RJi				0,40	1,70		7,57	8,50	"8,93	),38	9,84	10,80	12,40 (1100 К)	
Ru	(а,,)						7,0	8,70	9,09	9,49	9,92	10,83	11,81	12,87
	(=•1)	–					4,8	5,8	5,94	6,16	6,45	7,15	7,95	
S	(ромб.)						57	64.1						
	(моноклин.)							80						
Sb	(а j,)	–	0,04	5,19	13,17	15,8	16,15	16.2						
	(=•1)	–	–0,01	0,47	2,31	5,99	7,72	8,31						
	(®ср)								11,4	11,7	11,8	11,8		
SC	(а„)	–				15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,4	16,1	
		–				7,2	7,4	7,61	8,07	8,53	8,99	9,93	11,9	
Se	(монокли.1.)	–			-19,9	-13,8	-13,3	-13,4						
	(^11)													

Продолжение табл. 10.1

Элемент	Температура, К													Дополни-литература
	5	10	30	50	100	20Э	300	400	500	600	800	1000	1200	
Щ^х)	–	2,4	29,7	42,0	53,5	62,4	69,8	—	—					112]
(стекл.)	.	3,7	21,6	28,1	31,1	38,4	53,9	–	–	–	–	–	–	[12]
(гекс.)(аср)	.	.	–	20,2 (140 К)		22,5	26,4	40,5	45,2 (478 К)		.	–	.	[13]
Si	0,0001	0,0009	-0,052	-0.24	-0.34	1,43	2,54	3,05	3,39	3,68	4,19	4,65	—	[14]
Sm (ctcp)	–	–	–	–	–	–	10,4	.	–	–	–	–	–	–
a-Sn	.	.	-0,82	0,38	3,48	5,21 (220 К)		.	–	–	–	.	.	.
P-Sn (а,,)	0,18	1,65	13.7	18,5	23,2	26,5	31,4	37,2	41,4	–	–	–	–	–
	-0,025	-0,1	1,2	4,9	11,8	14.8	16.0	18,6	20,3	–	–	–	–	–
Sr	-0,037	0,27	8,2	13,7	19,4	.	22,45 (283 К)		–	22,2	20,0 (850 К)		.	[2]
Ta	0,009	0,048	0,92	2,40	5,02	6,25	6,6	6,72	6,84	6,95	7,12	7,32	7,53	—
Tb (аср)	.	–	–	–	–	–	7,0	8,6	9,5	10;0	11,1	16 (1100 К)		[15]
Tc (аср)	–	–	.	–	–	–	8,1	–	–	–	—	—	–	–
Te (a Ⅱ)	-0,274	-1,81	-9,5	-8,1	-4,2	-2,3	-2,0	-2,69 (450 К)		.	–	.	–	.
	0,34	2,48	17,2	23,3	25,9	28,0	29,3	31,9 (450 К)		–	.		–	.
Th	.	–	7,3 (70 К)		9	10,3	11,2	12,3	13,1	13,7	14,8	–	.	–
Ti	–	0,03	0,5	1,76	4,59	7,23	8,3	8,82	9,34	9,86	10,96	12.08	11,95	–
Tl («l1)	5,3(7 К)	–	20,6	24.6	29.3	33,9	–	.	–	–		.	–	.
	1,3(7 К)		14,2	21,5	23,2	25,0	–	–	–	–	–		–	–
М	.	–	–	–	–	–	29,6	30,3	41,5 (530 К)		.	–	–	.

Продолжение табл. 10.1

		Температура, К												Дополнительная литература
Tт	(a „)							20				22 (1050 К)		
												14 (1050 К)		
	(acp)		—0,7	**2,2**	- 1 , 3 (56 К)	3,0	5.0	5,8						
и	(=,«)		- 1 3 6 (36 К)		23,9 (90 К)		25,7	**26**	**26.2**	30,2	35,1		54,7 (900 К)	
	(Ч)		**-28,2** (36 К)		2,9 (90 К)		1. 6	0,4	**−0, 8**	- 2 , 5	- 5 , 6	- 1 7 , 2	- 2 5 (900 К)	
			52,1 (36 К)		10,9 (90 К)		15,0	18,0	21. 6	25.8	30,7	41.6	47,2 (900 К)	
		0,025 (6 К)	0,045	0,35		3,95	7,49	7,84	8.5	9,3		10.7	11,7	12,7
		0,00044	0,007	**0,2**		2,3	4.1	4,6	4.6	4,6 6.5 (2000 К)		4,8	4,9 8,8 (3200 К)	
		8,7	40	140,3	183,0	263,0	420,7 (155 К)							
		0,17	1,23						25,7	27,0		33,1	33,7 (850 К)	
Yt	(=41)			2, 1		13,7		19,2	19,4	19.6	19,7	20, 1	22,3 (1050 К)	
				0,3		2,9	4,3	4,6	5,0	5,4	5,6	6,7	10, 1 (1050 К)	
Zn	(a „)	0,05	0,76	33,4	54,1	65,4	65,6	63,5	61. 0	58,9	50,3 (650 К)			
	(« l)	**−0, 001**	**- 0 , 0 6**	- 4 , 3	- 3 , 0	4,1	10,4	13,2	15,7	17.7	27,9 (650 К)			
Zr	(a „)						6,55	7,36	**8, 20**	9,07		11,84	14,87 (1100 К)	
							4,87	4,99	5,09	5,16		5,19	4,94 (1100 К)	
	Ы)		0, 02	0,75										

Таблица 10.2. Температурный коэффициент линейного расширения индивидуальных соединений. Приведены значения истинного ТКЛР а (приданной температуре) или среднего ТКЛР а (в интервале ДТ)

	т. АТ. К	1(Г« К-»	Литература	Вещество	*Т, АТ, К*	10-е,
AgBr	300	34,3	16]	БеО	300—373	5,42
AgCl	300	30,1	13]		300—673	7,08
	473	34,54	13	**Bi^Teg (a„)**	50	13
	698	69,99	13		100	18
AgGaSe^	300	7,1	33		200	20
a-. P-AgI	100	—0,3	1]		300	21,3
	200	—0,9	[1]		400	22,6
	300	—1,5	1		600	24
	400	—3,2		(«x)	**30**	5
	600	36,83	1		**50**	g
	750	44,6			**100**	И
7-AgI	120—300		r		**200**	12
AglnSe^	300	1^9	[3		**300**	12,9
Ж'"	300	4,3	[33]**1**		400	**15**
	300	3,5	[1]		600	**17**
	400	4.1		СВГ4	200	**1,03**
	288—1113	5.2	11		300	1,50
AIN	300—873	4,8		(CH2NH,COOH3)BeF4 (триглицинфторобе-риллат)		
A1,Оз *(a^^)*	300	6,7	31	*bio)*	100	15
	400	6,46	31		200	0
	600	7,38	31		300	20
	800	7,99	31	*bio)*	100	48
AiPs	300	5,0	[31		200	64
	400	5,82	[31		300	50
	600	6,68	[31	**(«oи)**	100	10
	800	7,23	[3I		200	16
	30	—0,90	[1]		300	10
	50	—0,94	[1]	(CH,NH2C00H3)H2S04 **(триглицинсульфат)**	100	5
	100	0,49	m			
	200	3,36	1]			
	300	4,08	[1	**(«ш)**		
	300—1323	4,88	1		**200**	**3**
As,03	300—1273	8,4	16		**300**	**30**
AspSQ	300—438	24,62	13	*bio)*	**100**	40
	300—1073	4,5	34		**200**	**41**
	300	7.5	[29]		**300**	**—10,5**
	400	4,0	[35]	(«001)	100	**10**
	600	5,0	[35]		200	**16**
	800	6,2	35		**300**	8,5
	300—1073	6,8	16'	(CH2NH2COOH3)H2Se04 (триглицинселеиат)	**100**	5
	30	**0,7**		(«юо)		
	50	**2,9**	Iv3		200	0
	100	**9,9**	3		300	- 3 0
	200	**16,1**	3	*bio)*	100	12
	300	18,4	Iv3		200	35
Ba(N03)2	3—77	3,3	16]		300	—30
	77-200	6,7	16	**(«001)**	100	10
BaNaNbsOis	300	15,2	[16]		200	16
BaSia	300	10,9	[36]		300	95
BaSia	300—1373	8,4	Г16]			
BaSrNb^O, (a„)	300	10	[36	CaBв	300	6,5
	200-900	9	'36		200	22,4
BaTiOs (ромбоэдр.)	113—174	8,8	17		300	24,4
(куб.)	200	6,5	18		400	26,6
	300	7.5	17	CaCO3 (a„)	323	5,41
	400	8.6	118		200	
	773	12.3	117			
BaTiOa (тстр.)	300	11.4	118 1			
	293—393	3,5	17[1			
(орторомб.)	174—277	11,4	18	(«x)	300	5,68
Be,C	300	5,6	16		323	5,2
	300—473	7,7	16'		638	—3,8
	300-673	9,5	16	CaCla	300-463	22,3

	T, дг, к	К-»	Литература	Вещество	*T. AT.* К		Литература
CaF,	30	0,3	***ил Ц***	**CmOa**	300	8,1	31]
	50	1,6	***Ц***		400	8,1	31]
	100	7,52	f1,31		600	8,1	31
	200	15,6	[1,3]	Ст^Оз	773-1073	6,6	31
	300	18,80	1,3]	CoFa (a„)	300	3,6	28
	320	19,09	1,3]	(«x)	300	10,7	[28]
CaMo04 *{aj*	300	19.4	1'0	CoO	**300**	14,0	1
(«c)	300	25.5		CoSb	**100**	8,3	**Ц**
CaO	300-573	10,2	**i?l**		**200**	11,4	Ч
	300—673	**13,2**	**37**		**300**	12^5	[3
Ca6(P04)3	**300**	**9**	**20**	CoSi	**300—1073**	10,6	[16
CaTiOs	**300**	**10**	**24**	СгзС,	300—373	8,8	[27]
Ca3(Y04). (O	**300**	**5,5**	[20]		300—873	8,0	[34]
CaWOs (Z)	**300**	**3,5**	[20]	CrN	300—1073	2,3	
	80—300	**7,9**	[17]	CrOs (a„)	300	-10,3	**IIII**
	300	**11,2**	[20]	(«x)	300	16,2	[31]
	400	11,2	[17]	CrS	300-1300	12.3	34]
	773-1073	13,8	[20]	Cr^Sa	300	12,3	25]
	80—300	12,7	Г17	CsBr	30	20,0	3]
	300	18,7	[20]		50	28,7	13]
	400	18,7	17		100	38,6	3]
	773-1073	22,0			200	43,1	13]
	300	11,4			300	46,6	[3]
	300—1173	8,7	**16**]		400	52,24	[13]
T	300	27,0			600	61	[3, 13]
CdGeAss	300	11,4		CsCl	300	44,8	16]
CdGiePs	300	3,2	3]	Csl	300	48,6	17]
(стекл.)	300	5,2	3]	CU3ASS4	300	3,2	25
	323	29,1	16]	Cu3AsSe4	300	9,5	25
« A	300—373	10,5	37	CuBe	300—1073	6,5	16
	300—1073	10,0	37	CuBr	293—423	19	13
	300	9,63		CuCl	293—413	10	13
	50	—2,4	**f.** 13]	CuGaSea	300	5,4	[25
Ц)	77-298	2,1	1]	CuGaTea	300	6,9	[33
	300	4,1		CuOe3	300	7,8	[25
	600	4,2	**If**	CuGeSea	300	8,4	
	800	4,8	13]	Cul	300-875	25,2	
(« x)	77—298	4,0	1 13]	CulnSe^	300	6,6	25]
	300	6.5	1i	CuInTes	300	7,1	
	600	**6,6**	1,	Сиз3ЬБе^	300	7,1	
	800	***7,8***		Cu^SnSea	300	**8,9**	**25**
CdSe («x„)	77-298	2,45	131	СЬIг3пЗз	300	**7,8**	
(«x)	77—298	4,4	1' **Ізl**	DyBi	300	**10,2**	
CdSnAs^	300	4,7	***zoi***	CyaO3	300-1113	8,3	34]
CdTe	30	—2,75	15]	Erli	300	10,8	3]
	50	—1,80	1]	**Er^O3**	373-573	5,7	[31]
	100	1,38	113J	**EU0O3**	300—373	10,4	[31]
	200	4,09	14	EUB/	300	6,9	[38
	300	4,96		EuS'	300	14,6	[25]
	400	5,10	**[1]**	EuSe	300	18,6	[25]
	600	5,45	[13]	FeF, (a„)	300	—0,4	[28]
CdTlaTe^	800	5,8	3]		300	16 8	1'91
	200	1,66	3]	**M**	300	***7,9***	['O]
Сев,	300	2,35	16]	***Ш***	293—1273	**22,1**	[34]
	300-1073	7,3	[25]		320	**8,9**	
	300	8,5	[25]		30	**—0,30**	**if'**
	373—773	8,6			50	-2,15	3]
CesSs (a„)	300	13,2	[25]		100	—3,80	[3]
(« J	300	10,5	[25]		200	—0,90	[3]
Ce^Ses (acp)	300	12,6	[25]		300	1,85	[3]

FegSi	293—1273	14,4		HgBr	100	45,5	3J
FesSig	70	0,5			200	42,8	3)
	100	4,3	**f**		300	45,0	3'
	200	8,3	3	HgBr	100	4,8	3
	300	**8,2**	3		200	3,2	[3
FeTe^ (a^)	300	21			300	3,7	13
	400	24	[1	HgCl «„„)	100	44,1	[3
	600				200	43,0	3]
	800		**ill**		300	47,0	3!
FeTe, (aь)	300	46	[1]	(«ooi)	100	1,6	3i1
	400	48	11				
FeTe^ (afc)	600	58	Ч		200	0,3	[3
	800	80			300	1.4	[3]
	300	3		HgSe	300	1,48	ri
	400	7			400	1,64	1]
	600	15			500	1,66	1]
	800	**22**		HgTe	300	4,80	1
	10	0,0045			400	4,80	1
	30	-0,177		HoBi	300	10,5	1
	50	—0,15		H	300—1073	8,44	[3-
	100	2.05			10	—0,058	[1]
	200	4,93			30	—0,86	[1]
	300	5.82			50	—0,4	1]
	400	6,23			100	2,05	11
	600	6.98			200	3,80	1]
	800	7.4			300	4,41	in
GaP	300	5.6			400	5,07	(1
	400	5.7			600	5,67	1
	800	6,1			800	5,92	1
GaSb	10	**—0,026**		n.0.	300—1273	7,2	3
	30	-0,34		I	300	4,3	(Ij
	50	0,0			400	4,5	[1]
	100	2,81			600	4,9	[1]
	200	5,81			800	5,9	[1]
	300	6,36		Ins)	150	7,05	[31
	400	6,40			200	8,76	[31
	600	6,40			300	10,8	3j
	30	1,70		InS (a^)	150	9,48	3]
	50	3,02			200	11,5	[3i1
	100	5.83			300	14,2	3]
	200	8,14		InSb	10	—0,24	1I
	300	8.99			30	—1,5	2I]
	400	9,30			50	—0,4	[1 1
	77	9.2			100	2,60	21]
Ga.Teg	300	8.3			200	4,67	11
	300-1060	11,86			300	5,15	[21]
GdBe	300	8,7			400	5,3	rill
GdBi	300—1073	9.2			473	5,4	[21]
	300	10,0		InSe (a,I)	150	8,94	[3]
GeO^ (a„)	300	2,0			200	10,8	[3i1
	23	**6,0**			300	12,4	[3]
H p	83	**–6, 1**			150	11,25	[3]
	193	3.3			200	13,7	31
	273	39,2			300	16,0	[3j1
	300—1273	52.7		InTe («1,)	150	8,82	[3]1
HfB„	300-473	6,3			200	11,25	[3
HfC	300—873	**6,0**			300	14,0	[3
	300—1373	6.5			150	10,75	[3
HfN	530—1120	6,9			200	13,55	[3l1
HfOa	100	6.84			300	16,42	[3]1
HgBr (aj^)	200	53,4		lп,Тез	30	2,97	[1]j
	300	42.8			50	5,32	[1i
		45,0					

Продолжение табл. **7.14**

Inje,		100	8,03	LiNbOa (a^)		100	1,9
		200	9,94			200	8,5
		300	10,10			300	15,7
IrOs	(«„)	300	1,7			400	17.5
	(«x)	300	3,8			600	19.0
KBr		30	6,83	LiTaOg (cco)		300	12,0
		50	16,7				4,2
		100	29,3				7,8
		200	34.6	MgF?	(«I,)	300	13,42
		320-953	38			400	14,49
		30	3,11			600	16,86
		50	11,4				20,24
		100	25,4				9,44
		200	33,5			400	10,17
		300	37,0			600	12,59
		400	38,8			800	15,77
		600	45,4	MgO		293-373	11,7
		800	52,45			293-873	12.9
KF		200—300	45,0	Mg^Si		30	0,08
		300—355f	33,3			50	0,74
KH		300—673	36			100	5,49
KH,P04 (КДР, дигид-рофосфат калия)						200	12,31
		120	34,3			300	13,96
		200	34,3	Mg^Sn		30	0,85
		300	34,3			50	3,2
		120	21,6			100	9,2
		200	21,6			200	14,9
		300	21,6			300	16,0
		30	10,3	МпРг	(a„)	300	12.6
		50	19,3		(«x)	300	3,5
		100	30,3	MnS		loo	17,3
		200	35,8			156,7	49,9
		300	41,2			200	11,6
KNaC4H40j • 2H2O (сегнетова соль)		100—200	38,0			300	17,3
		200—300	40	MnSs		293—343	11.1
LaBe		293	40,2			300-773	6,69
ЬаРя		300	6,4	МПО2	(«)	300-773	6,93
		300	20,0	MCC		285—463	7,8
		300—923	10,6			300—1073	6,15
		300-473	8,45			293—1373	6,2
		300-1273	12,01			300—1273	10,7
LaS		300	11,6	Moll		293—1073	16,3
		300	9,9	MoSis		293-1723	5,1
		300	11,9	NH4Br		300	59.3
		300-1373	8,7	NH4CI		313	62,5
		100—200	39,3	NH4H2PO,	(a„)	200	87
		200—300	46,6			290	80
		273—350	46,6			200	40
LiCl		273—350	40,6		*bJ)*	290	35
LiF		30	0,24			200	41
		50	2,96		(c)	290	61
		100	15,2	NaBr		100—200	31,0
		200	28,1			200—300	36,7
		300	33,7			288—333	45.5
Lil		100-200	47	NaCl		100	33,9
		200—300	55,7			200	37
		273—350	56			300	39.6
LiNbOs	(«„)	100	1,0	NaF		90—300	23,0
		200	3,8			300	33,13
		300	4,0			468	35,9
		400	2,0	NaH		300—673	64,0
		600	2,0	NaNOg		323	11
						400	12.4

	300	18,2	[16]	Pr^Ss	300	11,3	25]
	300—1273	8,0	(34]	Pr^Seg	300	13,0	25]
	300—773	6,25	[32]	PuC	300—1053	10,7	34
	300—1273	10,1	[34]	PU2C3	300—1053	14,7	34
	300—473	0,0	[31]	PUO2	300—773	9	31
	473—673	- 1 , 2	[31		400—1184	15,2	31
	300—1073	5,8	1311	RbBr	100—200	32,3	16
	300—1273	10,0	[34]		200—300	34,7	[16
	300-1273	7,3	16	RbCl	100—200	30,5	[16
	473	5,53	[37		200—300	32,8	[16]
	1073	11,37	[25	RbHS04 (a^)	100	50	[3]
	300	12,5	25		200	60	[3]
	300	15,4	25		300	60	[3]
	300	12,9	25	K)	100	30	[3]
	300	13,5	25j		200	50	[3]
	300	10	31]		300	33	3]
	473	13,0	37	*i^c)*	100	35	3]
	675	13,5	37		200	49	3]
	300-1073	15,05	34		300	70	3]
	300-1073	12,65	[34]	Rbl	100—200	37,3	16]
	100	0,03	[3		200-300	39,7	16]
	200	- 13 , 5	3	RbHSOi («в)	300	60	3]
	300	1,1	3	**(«б)**	300	33	31
	100	8,7	3]	**(Oc)**	300	70	3]
	200	29,5	3]	**PbaOз (a,|)**	300	5,25	31]
	300	20,0	3]	**(i)**	300	5,35	[31]
	300—1143	16,5	34]	**RuO, (œ)**	300	—1,4	[28]
	100	7,5	[3]				
	200	24,0	**3]**	**К)**	300	7,0	[28]
	300	15,0	**3]**	5b,Oз	313	19,63	[161
	293-393	31	13	Sb^Sg	573—773	17	[1]
	348-463	31,6	16	**SbSI (a,,)**	300	15	3
	300	9,3	28	**(«l)**	300	42	[3]
	300	8,4	[28]	Sb,Se3	573—773	16	[1]
	30	7,54	[1]	**Sb.Tes**	573—773	12	1
	50	12,4	[1]	**S c b / (a,)**	300-873	7,6	34
	100	17,6	[1]		300-873	6,8	34
	200	19,8	1]	**ŠC2O3**	300—673	8,5	31
	300	20,3	**1]**	a-SiC	100	0,3	[1]
	30	7,65	1		200	1,2	1
	50	12,9	1		300	2,8	
	100	17,4		**(«u)**	400	4,0	1
	200	18,9			600	4,6	[1]
	300	19,8	1		800	4,7	
	30	9,02	1		400	3,9	[1]
	50	14,3	[1		600	4,2	[1]
	100	17,7	[1		800	4,3	
	200	19,6	1	P-SiC	100	0,3	**1**
PbTiOg	300	19,8	**[1**		200	1,2	**1**
	800	8,3			300	2,8	1]
	300	1,0	40		400	4,0	1
	400	2,0	40		600	4,5	**1**
PbTio.48. Zro_5203(aJ	600	4,0	40		800	4,5	1
	300	4,0	40		300	2,7	
	400	2,0	40]	**Sio/ (плавл.)**	4	—0,2	**f**
(«з)	600	- 5	40		10	—2,75	1
	600	11,0	18		30	- 8 , 5 4	[1]
	300	7,5	38		50	—8,46	]
	293-373	8,0	31		100	—6,10	1]
	293-1273	8,3	37		200	0,45	1]
	300	10,4	[25		300	4,50	1]
	300	14,3	[25				

Вещество	*Т. АТ. К*	10-^ К-'	Литература
SiO,	400	6,10	[1]
	600	6,25	
	800	4,80	
(«,)	300-673	4,1	[31]
(«x)	300—673	6,6	[31]
SmA	300-1073	10,8	[37]
SmATe	300	13,5	[25]
SmS	100	7,2	3]
	200	11,3	3
	300	11,8	[3]
Бга^ез	300	14,8	[25]
SnO, («ср)	300	3,4	[31]
(«11)	300—680	5,6	[31
K)	300-680	4,3	[31
o-SnS (ссср)	**300**	14,1	
p-SnS (a,p)	**300**	15,0	**1**
o-SnSe (a^p)	**300**	16,9	**j**
(n/I	**300**	-26^6	
S	**300**	**26,7**	1
g S e («ср)	**300**	**35.5**	1
	300	**22,1**	**1**
	30	**6,4**	**1**
	50	**14,0**	**1**
	100	**17.6**	**1**
	200	**20,4**	
	300	**20,8**	
	300	**6,7**	**i** i
fsrli)Ti03	**300**	**9'**	**24]**
SrF,	**30**	**0,4**	**j**
	50		
	100	**8^5**	**1**
	200	**15,7**	**1**
	273	**17,5**	**[1]**
|(N03).	**348**	**32,2**	**[1C]**
	300	**13,9**	**1**
5IO, (a,,)	**300**	**3,6**	**.1**
(«,)	300	3,3	[28]
ЭТIO3	300	9,4	[13]
TaB,	300-1273	8,2	[34]
TaC	300—773	6,29	[27]
TaN	300—973	3,6	[34]
	300-1273	5,2	[16]
TaA	300—673	0,8	[31]
	300	13,9	[25]
TaSia	300-1273	8,85	[16]
TbBe	300	7,8	38
TbBi	300	9,8	3]
TbO,,8i	300—1273	3	31
The,	300	5,8	3^
	300—1073	7,8	3f
The	300	6,53	3-1
ThO,	300—673	7,1	31
	300—873	7,7	31
ThS	300—1053	10,2	34]
TiB,	290—673	5,5	
TiC	100	6,2	
	200	6,8	2
	300	7,3	B]
Til4	243-398	74	**[le**
TiN	300	4,7	1
	300—1373	9,35	i34
TiO	300	6,73	[31

Вещество	*Т. АТ,* К	lo-e к-i	Литература
TiO^ (a,,)	300	9,80	131]
	300—673	10,1	31
	670—1073	10,8	31
(« x)	300	7,44	31
	300-673	8,0	[31
	670-1073	8,3	[31
SI?	300—400	4,5	[31
	300	8,2	34
	300—1273	17,0	(34
	300—1573	8,1	[16
TlBr	243—398	51,2	[16
TlCl	288-333	54,6	[17
Tll	300	45,0	[16
	373—573	7,1	[31
	300—573	9,0	34
	300—573	8,0	34]
	300—1273	7,0	34
UC	300-1273	10,4	34
UN	318—1273	8,61	34
u o .	300—673	9,2	31
	673-1073	10,8	[41
us	300-1253	11,9	34
v c	100	5,7	28
	200	6,2	**28**
	300	6,6	31
	300—573	7,2	**27**
V3N	300—1373	8,1	34
	300	5,8	34
S S	300	6,7	34
w c	300—673	3,84	27
WSi^	300—700	6,25	[34
YbBe	300	5.8	[34
Yb^Og	373-573	4,9	3I
	300—1273	9,30	**31**
YAlO3	**300**	~7	**29**
Y3AUO,,	**100**	4,25	**20**
	200	5,8	**29'**
	300	7,5	**20**
YsAIFe^Oig	200	6,3	3]
	300	8,5	[30]
	600	11,1	[3]
YB^ ***(aj***	300	9,4	[34]
M	300	8,5	34
YBe	300	6,2	38
VsFesOia	200	7,0	29'
	300	8,3	30
	600	11,0	30
Yi.sGdi.sFeA.	200	6,3	30
	300	8,1	3]
	623	10,4	301
Y.O3	473	6,9	[13]
	1073	8,1	13
YVO4	300	20	29
	300	10,4	3]
	300—433	29	16]
ZnF, (a,,)	300	11,3	[28]
(«x)	300	8,6	[28]
ZnGeAs^	300	1,0	
ZnO (a^,)	30	-0,48	**i f**
	50	-0,88	31]
	100	—0,62	3]
	200	1,58	si]

ZnO (а,,)	300	2,92	[3]	ZnSe	400	8,17	[1
	300—673	5,0			600	9,97	[1
	30	—0,27			800	11,69	[1
	50	—0,50					
	100	—0,04		ZnSnAsa	300	2,3	[25]
	200		[31]	ZnTe	30	—0,72	1]
	300	*4,75*			50	0,36	1]
	300—673	5,5			100	4,17	1
	300	8,33			200	7,58	1
	50	—0,34			300	8,29	[1
|п1%уб.)	100	1,72			400	8,7	[1
	200	5,17			700	9,65	[1]
	300	6,0		ZrB,	300—1073	5,9	[34]
	600	6		ZrC	100	5,1	3]1
	800	6			200	5,8	з:21
ZriS (гекс.)	100	**2, 0**			300	6,1	27]
	200	5.0			300—873	6,80	[3]
	300	6.1		ZrN	300-1373	7,24	[34]
		6		ZrO,	300—453	4,5	[31]
		-2,87			300—873	8,4	137]
	50	-1,51					
	100	2,57		ZrS,	300-1273	11,7	[34]
	200	5,86		ZrTiOi	300	7,5	[24]
	300	7,14					

Таблица 10.3. Температурный коэффициент линейного расширения неорганических соединений при температуре выше 1000° С. Приведены значения истинного ТКЛР ***а*** (при данной температуре ***Т)*** или среднего ТКЛР а (в интервале АГ)

Вещество	*т. АТ.* К		Литература	Вещество	*Т, АТ,* К		Литература
А1,Оз	20—1000	8,1	[31]	**CeOr**	20-1000	8,5	[37
	20 -1200	9,1	37]		20-1200	12,5	[37
	20-1400	9,8	[31	CrB	20—1000	12,3	[34
	20—1600	10,3	371		1000—2000	12,6	[34
	20- 1800	10,6	31	**СГэС,**	20—1000	11,7	27
	20—2000	9,14	37		20-1200	11,7	**[27]**
(«„)	1027	11,04	[37	Cr^Oз	20—1400	9,6	[311
	1727	11,99	[37]1	Еи,Оз	20—1000	10,3	[37
	1027	9,97	37 1		20—1200	10,3	[37
	1727	10,75	[37		20—1600	10,4	[37
	80—1000	4,6	[34	HfB^	20-1000	6,3	134
	1200	3,1	[34		1100—2100	6,8	[34
BeO	20—1000	9	31 1	HfC	20—1000	6,6	[15
	20—1200	10,1	37		20—1200	6,67	[32]
	20-1400	10,3	31		**20—1400**	6,8	15]
	20—1600	10,7	37		**20—1600**	6,87	[32]
	20—1800	10,85	31		**20 1800**		**It)**
	20-2000	10,95	37		**20—2000**	6^8	**32**
	1200—2000	13,4	37		**20—2200**	6,9	**15**
CaO	20—1000	14,2	31		**20—2900**	8,0	**32**
	20—1200	14,75	37	HfOg	**250—1300**	5,8	**37**
	20—1600	15,71	31		**20—1700**	6,45	**37**
	20—1800	16,02	37	MgO	20—1000	14,2	[31
	20—2000	16,29	31		20—1200	15,38	31
CdPs	20-1000	10,5	37		20—1400	15,95	31
	20—1400	10,5	37		20—1600	16,47	31

Продолжение табл. 10.11

	г, дг, к		Литература
	20-1800	17,08	31
	20—2000	17,49	31
	20—2200	18,60	31
	20—1000	6,4	[27
	20-1200	6,7	[27
	20-1400	7,0	[27
	20-1600	7,35	[27
	20-1800	7,6	[27
	20—2100	9,75	[27
NbBj	20—1000	8,0	34
	20—2000	8,5	34
NbC	20—1000	6,88	[27
	20—1200	6,90	[27
	20—1400	6,92	[27
	20—1600	7,15	[27
	20—1800	7,41	[27
	20—2000	7,57	[27
	20-2900	8,02	[27
NdA	1000	11,37	[27
	то—1000	11,8	[371
NiO	1000	14,1	[37
	1400	14,9	[37
	1800	16,3	[37
& A	20-900	7,6	[37
	20—1800	7,7	[37
SmA	20-1000	9,9	[37
	20—1400	9,3	[37]
TaB,	20—1000	8,2	[341
	1000-2000	8,8	[341
TaC	20-1000	6,64	[27
	20-1200	6,67	[27
	20-1400	6 89	[27
	20-1600	7^29	[27
	20—1800	7,59	[27
	20—2000	7,94	[27
	20-2900	8,81	[27
TiO,	20—1000	9,4	[311
	20-1200	10,3	[31]
	20-1400	10,4	[31]

Вещество	*Т,* ДГ, к	io-=K-'	Литература
ThOa	1400—1970	12,31	
	2000—2300	13,3	
т ш .	20—1000	4,6	
	1000—2000	5,2	
TiN	20—1000	7,5	
	20—1200	7,5	
	20—1400	**7,9**	
	20—1600	**8,1**	
	20-1800	8,3	
	20-2000	8,5	
	20—2200	9,1	
	20—2700	9,6	
u o .	800—1260	12,9	
VB,	20—1000	7,6	
	20—2000	8,3	
v c	20—1000	6,25	
	20—1200	6,60	
	20—1400	6,95	
	20—1600	7,45	
	20—1800	8,10	
	20-2000	8,95	
	20—2200	9,60	
w c	20—1000	4,87	
	0—2400	7,3	
Yt.03	1000	8,3	
	1200	8,6	
	1400	8,8	
	1600	9,1	
	1800	9,3	
ZrB,	20—1000	5,9	
	1000—2000	6,5	
ZrC	20—1000	6,99	
	20—1300	7,20	
	20—1800	8,1	
	20—2400	8,77	
ZrOa	20-1000	9,1	
	20—1200	9,5	
	20—1400	9.47	
	20—2100	13,0	

Таблица 10.4. Средний температурный коэффициент линейного расширения кварцевых и оптических стекол а, 10"' [4, 42, 43] (Если температура отличается от указанной, ее значение приводится в круглых скобках)

Марка стекла	дг, к			
	170-293 I	210-293	• 293-300	293—400
	Кр.арцеевые стекла			
КЛР-1	—1,5(223—293)		—1,0 273—293)	
КЛР-2	-1,9(223—293)		—1,0 273-293)	
кчг	4,2(223—293)		4,5 273—293)	
КУ-2, КВ (истинный ТКЛР, о, 10-' К-1 [61])	—1,10(170)	1,40(210)	4,7(293)	
	6,1 (473)	5,3 (673)	3,4(1073)	
Пирекс	28,2 I	29.2 I	39,2	
	Оптичгские стекла			
ЛК1	110	111	112	113
ЛКЗ	85	86	88 4	92
ЛК4	49	50	51 ,'5	52
ЛК5	32,0	33,0	34,4	35

Продолжение табл. 10.4

Марка стекла	ДГ, к			
	170-293 1	210-293	• 293-300	293—400
ЛК6	78,0	80,0	81,4	83
ЛК7	38,0	40,0	41,3	44
ЛК8	—	54,0	55,3	56
лкю3		84,0	86,4	
ЛК105		32,0	34,5	
ЛК107	—	40,0	41,2	
ФК1	83,0	84,0	87,2	91
ФКЗ	—			78
ФК4	—			107
ФК13	61,0	62,0	68,2	73
ФК14	—	88,0	92,0	98
ФКПЗ	—	63,0	64,0	(273-293)
ФК114	—	87,0	92,0	(273 - 293)
К1	59,0	60,0	62,7	65
К2	56,0	57,0	60,3	64
КЗ	72,0	74,0	77,3	83
К5	66,0	67,0	70,3	74
К8	66,0	68,0	73,2	76
К14	61,0	62,0	66,0	70
К15	79,0	81,0	89,0	93

Продолжение табл. 10.11

Марка стекла	ДГ. К			
	170-293	210-293	293-300	293-400
К17	64,0	66,0	69,4	74
К18	62,0	64,0	67',4	71
К19	72,0	74,0	76,5	80
К20			71,3	75
к ю о	- 1	7О!О	73,5	(273-293)
К108	–	66,0	69,3	(273—293)
КП9	—	70,0	73,5	(273—293)
ОКI	–	–	–	136
БК4	73,0	74,0	76,2	80
БК6	73,0	74,0	77,1	83
БК8	55,0	56,0	59,1	63
БК9	67,0	68,0	72,1	76
БКЮ	63,0	65,0	67,0	72,5
БКП	59,0	60,0	62,1	66,5
БК12	70,0	71,0	73,1	77
БК13	61,0	62,0	65,1	68,9
БК104		71,0	74,2	
БК106		75,0	78,3	
БКПО		65,0	67,2	
ББК1	—			99
ББК2				94
ТК1	58,0	59,0	60,2	61
ТК2	63,0	64,0	67,2	70
ТК3	–	54,0	–	60
ТК4	58,0	59,0	62,2	66
ТК7	–	67,0	–	73
ТК8	60,0	62,0	66,2	70
ТК9	67,0	68,0	72,1	76
ТК12	57,0	58,0	61,2	65
ТК13	60,0	61,0	64,1	67
ТКИ	61,0	63,0	65,1	69
ТК16	63,0	66,0	69,1	71
ТК17	68,0	68,0	72,2	75,5
ТК20	66,0	67,0	70,1	73
ТК21	72,0	73,0	76,1	81
ТК23	51,0	52,0	55,2	58
ТК104	–	58,0	61,3	–
ТК109		68,0	71,2	
ТК114		60,0	63,3	
ТК115		63,0	66,3	
ТК121		72,0	75,2	
ТК123		50,0	**54,4**	
СТКЗ	69,0	71,0	74,0	(273—293)
СТК7	82,0	84,0	88,0	(273-293)
СТК8	83,0	84,0	87,0	(273-293)
СТК9	50,0	51,0	54,0	(273—293)
СТКЮ	43,0	45,0	49,0	(273-293)
СТК12	49,0	57,0	61,0	(273—293)
СТК15	–	57,0	59,0	(273-293)
СТК16	–	58,0	61,0	(273—293)
СТК19		51,0	53,0	(273-293)
КФ1	62,0	63,0	64,2	66
КФ3		83,0		91
КФ4	62,0	63,0	66,2	71
КФ5	59,0	59,0	60,1	62
КФ6	60,0	62,0	65,3	68
КФ7	54,0	55,0	57,3	60
КФ8	70,0	72,0	74,1	76
БФ1	65,0	66,0	69,2	72,5
БФ4	69,0	70,0	72,1	74
БФ6	76,0	77,0	80,1	83
БФ7	67,0	68,0	71,2	75
БФ8	76,0	77,0	79,2	82
БФ11	61,0	63,0	67,2	70
БФ12	82,0	83,0	85,2	87,5

Продолжение табл. 10.11

Марка стекла	АГ. К			
	170—293	210-293	293—300	293—400
БФ13	59,0	61,0	65,2	68
БФ16	76'o	78,0	81,2	84
БФ18	71,0	72,0	75,2	79
БФ19	69,0	70,0	73,2	76
БФ21	70,0	71,0	74,1	77
БФ23	69,0	70,0	71,2	73
БФ24	72,0	74,0	76,2	79
БФ25	65,0	66,0	69,1	73
БФ26	63,0	64,0	67,2	70
БФ27	74,0	75,0	77,1	80
БФ28	58,0	59,0	62,2	65
БФ32	—	103	107	–
БФ101	–	66,0	69,8	–
БФ104	–	69,0	72,0	–
БФ106	–	76,0	79,0	–
БФ112	—	78,0	82,0	
БФ125		65,0	69,0	
ТБФЗ, 4	63,0	65,0	69,0	(273—293)
ТБФ5	–	54,0	58,0	64
ТБФ7	–	58,0	61,0	(273—293)
ТБФ8	–	55,0	58,0	(273—293)
ТБФ25	—.	55,0	59,0	(273—293)
ЛФ1	79,0	80,0	83,2	84,5
ЛФ5	66,0	67,0	69,4	72
ЛФ7	70,0	71,0	73,3	74,5
ЛФ8	83,0	84,0	87,5	90
ЛФ9	80,0	81,0	85,5	
ЛФЮ	71,0	72,0	74,6	78
ЛФП	70,0	71,0	72,8	74
ЛФ12	85,0	86,0	88,3	91
ЛФ105		67,0	70,0	
Ф1	70,0	71,0	72,2	74
Ф2	69,0	70,0	72,2	75
Ф4	72,0	73,0	74,1	75,5
Ф6	69,0	70,0	72,2	74
Ф7	68,0	70,0	72,2	74,5
Ф8	94,0	95,0	98,1	101
Ф9	89,0	90,0	93,1	96,5
Ф13	69,0	71,0	72,2	74,5
Ф18		106	109	
Ф101		69,0	70,5	–
Ф104		70,0	71,3	–
Ф106		68,0	70,2	
Ф108		91,0	95,0	–
Ф109	–	90,0	92,5	–
ФП3	–	68,0	70,4	–
ТФ1	81,0	82,0	84,3	86,5
ТФ2	71,0	73,0	75,3	79
ТФ3	76,0	77,0	81,0	82,5
ТФ4	76,0	77,0	80,4	82
ТФ5	77,0	78,0	8.1,3	83
ТФ7	92,0	93,0	95,3	96
ТФ8	76,0	77,0	79,3	82
ТФЮ	74,0	75,0	77,4	82
ТФ11	95,0	97,0	104	108
ТФЮЗ		75,0	77,3	
ТФ107	–	88,0	90,4	–
ТФПО		75,0	77,3	
ОФ1	58,0	59,0	61,4	63
ОФ2	69,0	70,0	72,2	74
ОФЗ	46,0	48,0	51,3	55,5
ОФ4	46,0	48,0	51,3	52
ОФ5	44,0	46,0	49,0	53
ОФ101	–	58,0	60,4	–

аблица 10.5. Температурный коэффициент расширения технических стекол. Приведены значения истинного ТКЛР а (при данной температуре) или среднего ТКЛР а (в интервале температур)

Стекло	$\cdot \frac{\wedge}{К^{\circ}}$ 1	Стекло	10-' К-'
Лазерные стекла СССР. ЗОЭ—400 К [20, 29]			
ГСЛ-1	94	ГСЛ-21-ГСЛ-24	106*i
ГСЛ-2	119	ЛГС-247-2	116
ГСЛ-3	121	КГЗ-3	105*1
ГСЛ-4	103	КГС-5	104*1
Зарубежные лазерные стекла, 300 К [20			
FG,		LGi	99,5
FG,	70	LGs	102,0
FG,		LGg	104,0
LG-52		LG4-LGe	54,9
LG-54			
LG-55		Ва—крон	110,0
Волоконно-оптическое стекло, 300 К \43			
Оболочечное,	53	Волоконно-оптические пластины, ВОП	32—73
Сердцевинное,	92		
Оптическая керамика. 300—400 К [43, 44]			
К01	113	К04	77
К02	69	КЭОЮ	24
К03	109,9		–
Инфракрасные стекла, 293—393 К [3, 17 43]			
ИКС22	226	Иртран-1	107
ИКС23	246	Иртран-2	66
ИКС24	182	Иртран-3	202*2
ИКС25	220	Иртран-4	77*2
ИКС26	166	Иртран-5	120*2
ИКС27	177	Иртран-51	115*2
ИКС28	220	KRS-5	580
ИКСЗО	122	KRS-6	560
К515	82	KRS-13	391*1
Резисторные стекла 293—393 К [29]			
С27-1	27	С74-1	74
С36-1	36,5	С77-1	77
С4М	41	С84-2	84
С63-1	63	–	–
Изоляторные стекла, 293—393 К [29]			
13В		N 1	1 94
	1		
Электровакуумные стекла [29], 293—S73 К			
С37-1	37,5	С40-1*з	40,0
G8-1*3	38,0	С47-1*4	47,0
С39-1*з	39,5	С48-1*4	48,0
С49-1*б	49,0	С89-1*'	89,0
С49-2*5	49,0	С89-2	89,0
CSl-l*"	51,0	С89-6	
С51-2*в	51,0	С90-1	9О!О
С87-1*'	87,0	Кварцевое	
С88-1*'	88,0	(300—350 К)	4,0
С88-2	88,0	(400—700 К)	6,0

Продолжение табл. 10.11

Стекло	10-" К->	Стекло	
Термометрические стекла, 273—373 К [42]			
ГОСТ 1224—41		600	33
	56,5	700	29,5
Лабораторные стекла, 300 К \42			
Термостойкое	**33,2**	Щ23	65
N13	**50**	N 51-A	48
N23		Uninost	98
N29	89,3	Pa! ex	64,9
T16	50'	Murano 1922 N	48
T28	40	G20	49
Ц32	88,6	Multal	50
КС34	91	Sial	50,6
Щ14	87,1		
Щ26	57,3		
Легированные стекла 373—573 К [29 , 45			
Алюмоборосиликатное		30—60	
Алюмоборосиликатное бесщелочное		8-38	
Иттриевое		171	
Кальцпй-алюмосиликатное		80—100	
Натрий-алюмосиликатное		87	
Фторбериллиевое СЛК-5		160	
Фторфосфатное № 436		165	
Строительные стекла, 300—573 К [42]			
Листовое оконное		80—95	
Молочное глушеное		83	
Пеностекло		5—6	
Порошковое С25-1		25	
Порошковое С48-2		48	
Порошковое С84-8			
Сортовое бесцветное		90—99	
Стекло для труб		50	
Стекло для труб пирексовое		32	
Стеклоцемент СЦ90-1		97	
Стекло цветное оптическое		<70	
Хрустальное свинцовое		94—105	
Стеклоэмали		70—120	
Микалес		80—90	

При 300 к •

в иитервале 293—573 К.

' Спаивается с W, Н30К13Д.

' Спаивается с Мо, 29НК.

Спаивается с 2ЙНК-

' Спаивается с Мо.

' Спаивается с Fe — Сг — N1-сплавом.

Таблица 10.6 Средний температурный коэффициент линейного расширения ситаллов а, 10"' К"^ [29, 42, 44]

Марка	дг. к					
	S 1 м	g 1	ёз	i	Й я ив	К J ив
СГЛ-1	—12,5	—8	-5,4	—2,1	1,2	3,6
СТЛ-2	-10	—6	-2,5	2,7	5,3	5,6
СТЛ-3	-2,5	0,6	3	0,5	6,5	9
СТЛ-4	-1,3	2	5,3	7,3	13,6	15,9
СТЛ-5	-0,8	5	5,6	6	7	19,5
СТЛ-6	2,5	7	8,8	11	13	14
СТЛ-7	6,2	12	12,5	13	15	16
СТЛ-8	10	16	16,2	16,5	17	18
СТЛ-9		38,1	38,1	38,1	38,1	38,1
СТЛ-10	80	100	106,2	125	120	90
СТМ-1	11	27	31,2	32	34	37
СТМ-2		44	51,2	56	56	57
СТБ-1	27.5	29	32,5	37	38	60
СТБ-3	21	30	31,2	33	48	88
СОI15М	0,0(1,5) (213-313 К)			2,5—6 (293-693 К)		
СО-21	—	—	-2,5(293-693 К)		5,3	—
СО-15	—	—	—	—	6,5	—
С-15-12					1,2	

Таблица 10.7. Температурный коэффициент линейного расширения чугуна [3, 4, 5]. Приведены значения истинного ТКЛР ajfnpn данной температуре Т) или среднего ТКЛР а (в интервале АГ)

Марка **или** название		10-« к-'
СЧ 00, СЧ **10**	20	10,0
СЧ 12-28, СЧ 15-32, СЧ 18-36, СЧ 21-40	20-200	11,8
СЧ 32-52	—77	11,2
ЖЧН15Д7Х2	20	20,0
АВЧ-**1**, АЧК-**1**	20	**II**
ЧМ 1,3, ЧМ 1,8	20—100	12,0
пч, пчи, хтв, хнв	20-600	13,6
Чугун:		
белый	20	7-11
	20—100	10
серый	20	**II**
ферритный ковкий	20—100	11
	20-^00	12,3
	20—500	13,6
	20—700	14,7
аустенитный	20-100	17
никелевый (14 % Ni)	20—600	18,0
хромистый (34,2 % Cr)	20-600	11,0
Составляющие чугуна:		
аустенит	20—100	17-24
феррит	20—100	12—12,Е
перлит	20—100	10-11
цементит	20—100	6—8,5
графит	20—100	7,5-8

Таблица 10.8. Температурный коэффициент линейного расширения сталей. Приведены значения среднего ТКЛР я, 10-е в интервале от 300 К до указанной температуры или значения истинного ТКЛР я, Ю"® К"'. Марки сталей расположены в порядке увеличения содержания легирующих добавок

Марка стали	Температура. К										Литература
	373	473	573	673	773	873		1073	1173	1273	
Углеродистые стали											
3, Зкп (а)		5,50 (100 К)		10,1 (200 К)		11,8 (300 К)		—			
0,8кп (о)	11,6	12,32	13,02	13,65	14,22	14,64	15,01				
10	11,6	12,6	13,0	14,6							
15	12,2	12,3	13,1	13,5	14,3	14,3	15,25	14,1	13,2	13,3	
20, 20кп	11,1	12,1	12,8	13,4	13,9	14,4	14,8	12,9			
25	12,2	12,7	13,1	13,5	13,9	14,4	14,9				
25Л (а)	11,5	12,9	13,0	13,2	13,5	13,8					
30 (а)	12,9	14,5	15,8	15,8	16,7	16,2	16,4	(923 К)			
35	11,09	11,89	13,42	14,02	14,43	—	—	—			
40	11,21	13,0	13,0	13,58	14,05	14,58	14,58	11,85	12,65	13,59	
45	11,59	12,32	13,09	13,71	14,18	14,68	15,08	12,50	13,56	14,45	
50 (а)	4,90 (100 К)		9,30 (200 К)		10,9 (300 К)			—			
	12,0	12,4	12,9	13,3	13,7	14,1	14,3	11,9	12,9	14.0	
У8 (а)	12,1	14,0	12,8	16,1	16,8	17,8	19,8	(923 К)			
У9 (с)	12,1	13,7	15,3	16,4	17,3	17,2	17,6	(923 К)			
У12 (а)	11,7	13,3	15,4	16,2	17,1	18,3	18,9	(923 К)			

Продолжение табл. 10.11

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
Хромистые стали											
15Х, 15ХА, 20Х	11,3	11,6	12,3	13,2	13,7	14,2			—	—	
30Х	12,45	13,0	13,4	13,75	14,15	14,55	14,8	12,0	12,8	13,8	
38ХА, 40Х (а)	-0,002 (5 К)		0,018 (10 К)		0,18 (20 К)	1.7 (50 К)		6,6 (100 К)	11,5 (200 К)		
40Х	13,4	13,3	–	14,8	–	14,8	–	–	–		
0Х13	10,5	11,1	11,4	11,8	12,1	12,3	12,5	12,8			
1Х13	10,15	11,2	11,4	11,8	12,2	12,4	12,7	13,0	10,8	11,7	
2Х13	10,2	11,2	11,5	11,9	12,2	12,8	12,8	13,0			
3Х13	10,2	10,95	11,1	11,7	12,0	12,3	12,5	12,6	10,6	12,2	
4Х13	10,65	11,5	11,85	12,2	12,5	12,75	12,95	13,2			
ШХ15 (а)	14,0	15,1		15,5		15,7					
08Х17	10,4	10,5	10,8	11,2	11,4	11,6	11,9	12,1			
9Х18, 9Х18Ш	11,7	12,1	12,4	12,9	13,3	11,8	12,1	12,4			
Х28	10,0	–	–	–	11,1	11,3	11,5	12,0	12,4		
Хромоникельсодержащие низко- и среднелегированные стали											
40ХН, 45ХН	11,8	12,3	13,4	14.0							
18ХНВА	11,7	12,2	12,7	13.1	13,5						
40ХНМА	11,7	12,2	12,7								
35ХНМ, 34ХН1М	11,7	12,2	12.7								
12ХН2	12,6	13,8	14.8	14.3							
30ХН2МФА (а)	5,01 (70 К)		7,40 (100К)		9,30 (200 К)		12,3 (300 К)				
30ХН3	11,2	11,8	12.4	12,7	13.2	13.5	13,9	10,8		13,1	
12ХН3А	11,8	13.0	14,0	14,7	15.3	15.6					
20ХН3А	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	14,5					
33ХН3МА, 34ХН3М	10,8	11,6	12.5	13,3	13,5	13.7					
						13,7					
35ХН3МФ	11,8	12.1	12,6	13,0	13,4						
0ХН3М (а)	5,0 (70 К)		7,60 (100К)		9,45 (200 К)		11,6 (300 К)				
12Х2Н4А	11,0	12,0	13,0	14,7	—	15,6					
18Х2Н4МА (а)	—0,06 (5 К)		-0,064 (10К)		0,32 (30 К)		6,5 (100К)		10,0 (200 К)		
	—	11,2	12,5	13,1	13,7	13,8	13,8	—			
Хромоникелевые стали с содержанием никеля меньше 20%											
13Х12НВ2МФ	11,0	11,3	11,6	12,0	12,3	12,5					
4Х12Н8Г8МФБ	16,0	16,9	17,7	18,5	19,5	19,9	20,2				
0Х12Н16БС4	16,45	16,7	17,4	17,65	17,85	18,1	18,3	18,55	18,65		
2Х13Н2	10,54	10,64	10,64	10,84	11,09	11,34	—	–	—	-	
1Х13Н2С2	10,78	11,41	11,82	12,26	12,71	13,12	13,32				
03Х13Н8Д2ТМ	10,2(77--300 К)			8,5 (20—300 К)							
Х13Н12М2В2Б1К10	15,6	15,8	16,5	16,9	17,1	17,3	17,7	18,0		18,6	
Х13Н13В2Б	16,8	17,3	17,9	18,3	18,7	18,9	19,1	19,3	19,6	—	
Х13Н13В2М2Б3К10	15,6	15,8	16,5	16,9	17,1	17,3	17,7	18,0	18,3	18,6	
1Х13Н16Б	16,05	16,9	17,7	18,25	18,55	18,75	19,0	19,25	19,6	19,65	
4Х14Н14В2М			17,0		18,0		18,0		19,0	—	
IX14H14B2M	17,0	17,8	18,3	18,8	19,0	19,2	19,4	19,9	20,5	—	
1Х14Н14В2МТ	17,2	17,2	17,5	18,0	18,5	18,6	18,9	19,3			
2Х14Н14В2СТ	16,1	16,7	17,2	17,4	17,8	18,2					
Х14Н14МВФБ	15,1	15,9	16,9	18,0	18,2	18,4	19.0				
Х14Н14М2В2ФБТ	–	–	–	16,7	17,1	17,4	17.8	18,1			
09Х14Н16Б	15,2	16,5	17,1	17,55	17,96	18,41	18,91	20,6			
1Х14Н18В2Б	16,5	17,4	17,6	18,0	18,1	18,2	18,5	19,0	19,0		
Х14Н18В2БР	15,9	16,5	17,2	17,6	18,0	18,3	18,6	18,7	19,0		
09Х14Н19В2БР1	15,2	16,3	17,2	17,6	18,0	18,1	18,6	18,6			
4Х15НГ7Ф2МС (а)	17,0 —	17,7 —	18,4 –	19,1	20,5	20,8	2278	22,78	23,32	— 24,64	

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
ОХ15Н7М2Ю	9,9	10,8	11,1	11,5	11,7	11,4	10,3	11,2	11,9	—	[5
1Х15Н9С3Б1 (а)	17,4	18,7	19^7	20,2	20,5	21,0	21,55	21,75	–	–	5
Х15Н15М2К3ВТ	15,75	16,6	17,15	17,6	18,25	18,6	–	–	–	–	15
ОХ15Н15М3	16,9	17,7	18,1	18,5	18,8	19,1	19,45	19,7	19,9	—	[5
ОХ15Н15М3Б	16,35	17,05	17,4	17,65	1'7,7	17,85	18,25	18,6	18,75	–	5
Х16Н9М2	17,0	17,5	18,0	18,4	18,9	19,3	19,5	–	–	–	[5
08Х16Н13М2Б		–	–	17,1	17.4	17,8	18,2	18,6			гз
Х16Н14Б	16,0		18,0		18,0	—	–	19,0	–	–	
1Х16Н16В3МБР	17,1	17,1	17,1	17,9	18,2	18,5	18,8	19,1	19,2	–	5]
07Х16Н16	–	11,7	12,1	12,5	12,9	—	–				bl, 521'
Х16Н16В3МБ	15,8	16,8	17,3	17,6	17,8	17,9	18,1	18,2	.	.	[5]
2Х17Н1	8,1	8,76	10,26	10,04	10,54	11,54	—	–	–	–	[52]
2Х17Н2	10,54	10,67	10,94	10,84	11,24	11,34	–	–	–	–	
1Х17Н2	10,3	10,4	10,7	11,1	11,8	–	–	–	–	–	
ОХ17Н4	9,7	10,2	10,6	10,9	11,2	11,3	9,6	9,6	10,2		[5
ОХ17Н4М2	10,6	11,0	11,4	11,6	11,9	11,7	11.1	11,7	12,3	—	[5]
Х17Н5М2	12,14	13,69	14,28	14,64	14,79	14,84	–	–	–	–	*Ш*
ОХ17Н13М2Т	15,7	16,1	16,7	17,2	17,6	17,9	18,2	–	–	–	
ОХ18Н7Ю1	15,6	16,5	17,3	17,9	18,1	18,4	18,5	18,7	–	–	[5]
Х18Н9	16,5	17,2	17,7	18,1	18,3	18,6	18,9	19,3	19,7	20,2	[5„ 37]
Х18Н9В		16,5	17,1	17,6	18,0	18,4	18,8	19,0	19,2	19,4	
1Х18Н9ВМ	–		16,65	17,15	17,45	17,8	18,0	18,2	–	–	5]
3Х18Н9В2ФТ	15,35	15,6	15,9	16,25	16,6	17,0	17,4	17,8	18,4	18,95	5
Х18Н9М	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	—	—	–	5
Х18Н9М2С2	16,6	17,0	17,35	17,7	18,05	18,4	18,75	19,1	19,4	19,75	5
Х18Н9С2	16,2	17,1	17,8	18,6	19,2	19,2	20,5	—	—	–	[5]
12Х18Н9Т («)	0,8 (20 К)		3,3 (50 К)		**8,40 (100 К)**		14,30 (200 К)		16,7 (300 К)		[3,52]
12Х18Н10Т (а)	17,55 (400 К)		17,99 (500 К)		**19,36** (700 К)		21,10 (1000 К)		22,92 (1300 К)		
Х18Н9Т	16,6	17,0	17,6	18,0	18,3	18,55	18,9	19,	19,&		[5]
Х18Н9ТЛ	14,8	16,0	16,9	17,1	17,6	18,0	18,4			–	[5;
04Х18Н10 (а)	3,0		8,0 (50 К)		10,8 (100 К)		15,4 (200 К)		15,5 (300 К)		[4,5]
Х18Н11Б	16,8	17,65	18,2	18,5	18,85	19,0	19,4	19,65	19,9	–	
Х18Н12	16,8	17,2	17,6	17,8	18,2	18,5	18,8		–		137]
ОХ18Н12Б	16,0	18,0	18,0	19,0	—	—	—	—	—	—	
Х18Н12М2Т	15,7	16,1	16,7	17,2	17,6	17,9	18,2	–	–	–	[5
Х18Н12МФТР	15,9	16,9	17,6	17,8	17,9	18,4	18,8	19,0	19,2	–	5
Х18Н12М3	16,0		16,2	–	17,5	18,6	–	–	–	20,0	15
Х18Н12Т	16,6	17,0	17,2	17,5	17,9	18,2	18,6	18,9	19,3		[5
Х18Н14М2Б1	—	—		17,6	17,8	18,2	18,7	—	—	—	5
Х18Н15М3БЮР2	14,95	16,15	16,8	17,1	17,5	17,75	18,15	18,3Е	18,25	–	5
Х18Н15М3БЮР4	15,05	15,75	16,4	17,15	17,35	17,6	17,85	18,1	18,45	–	5
1Х18Н15М3В2БК13			16,7	16,7	16,75	17,0	17,25	17,4	–	–	5
ОХ18Н15Р4	16,5	17,4	17,8	18,15	18,45	18,85	19,2	19,4Е	19,8	–	5
ОХ18Н15Р7	16,8	17,4	17,7	18,05	18,2	18,55	18,95	19,4	19,8	–	[5
10Х18Н18Ю4Д	15,5	16,5	17,0	17,4	17,65	18,2	18,4	18,8	18,6	–	[37]
3Х19Н9МВБТ	16,65	16,9	17,2	17,5	17,8	18,15	18,5	18,9	19,3	19,7	5]
Х19Н10М2Ф3БК47	14,8	15,0	15,1	15,2	15,3	15,9	16,4	16,8	17,2	—	[5]
Х19Н14Б2	17,0	17,2	17,4	17,6	17,9	18,6	18,8	—	—	—	[5]
2Х20Н11	17,3	–	17,8	–	18,4	18,7	–	–	–	–	[5
Х20Н14С2	16,0					18,1	18,3	18,5	18,8	19,0	[5]
ОЗХ20Н16АГ6 (ее)	0,01 (К)		0,06 (20 К)		0,57 (40 К)		8,27 (К0 К)		16,10 (310 К)		[51,52]
07Х21Ш5АГ7	9,3 (20—300 К)		11,5 (77—300 К)		14,6 (173—300 К)				–	–	[511

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	»	873	973	1073	1173	1273	
	15,7	16,0	16,8	17,3	18,0	18,4	18,5	—	—	—	[5, *п*
OX21H5T	9,6	13,8	16,0	16,0	16,4	16,2	16,5	16,7	17,1	–	[5
12X21H5T (а)	7,90 (100 K)		10,4 (200 K)		11,0 (300 K)		–	–	–	–	[3]
1X21Ш5T	10,2	14,4	16,8	16,8	17,4	17,5	17,7	18,0	18,5	–	[5]
OX21H6M2T	9,5	13,8	16,0	16,0	16,3	16,7	17,1	17,1	17,4	–	
X22H9	–	–	–	17,5	–	—	—	18,5	—	—	[5]
20X23H18	14,9	15,7	16,6	17,3	17,5	17,85	17,85			–	[37]
X25H13AT, X25H13T	–	–	–	–	17,1	–	–	–	18,1	–	[5]
12X25H16Г17AP	16,6	16,2	16,8	17,4	18,0	18,5	18,7	18,9			[3]

Хромоникелеевые стали и сплавы с содержанием никеля более 20%

10ХИН20Т3Р	15,9	16,4	17,2	17,9	18,4	18,9	19,2	8,15 (173—300 K)		[5, 51]
00X18H20C3M3Д3Б (а)	-0,25 (0 K)		0,61 (0 K)		5,95 (70 K)		14,3 (230 K)	15,8 (300 K)		[31]
3X20H20M4B4K45	–	–	11,8	12,4	12,7	13,0	13,5	14,0	14,4	15,0
X20H20Б1M3K20	–	–	–	15,7	16,1	16,65	17,2	17,6	17,8 (1523 K)	[51]
X25H20C2	16,1	—	—	—	—	17,8	17,8	18,1	18,5	18,8 [1]
X26H20Л	—	—	15,5	15,6	15,9	16,2	16,6	17,2	—	— [5.1]
X18H22B2T2 (а)	15,34	15,95	17,01	17,11	17,23	17,52	–	–	–	– [15]
10X11H23T3MP (а)	0,03 (5 K)		0,14 (ад K)		1,46 (50 K)		9,10 (100 K)		16,0 (30[0 K)	[4][5]
08X15H24B4TP (а)	-0,12 (4 K)		-0,42 (30 K)		5,18 70 K)		8,48 (100 K)		15,6 (300 K)	Г46[
X15H24B4T	14,5	15,5	16,3	16,8	17,2	17,3	17,9	18,5	–	— [5]
X15H24T2 (а)	3,60 (70 K)		5,85 (100 K)		14,3 (200 K)		16,4 (300 K)		—	— [5
1XI6H25M6	15,0	15,7	15,9	16,3	16,6	16,9	17,1	–	–	– [5]
36X18H25C2	13,0	13,6	14,7	16,1	–	–	–	–	–	– [5]
X25H25TP	12,95	14,35	15,2	15,65	16,15	16,5	17,25	17,30	17,75	– [5]
ХН3ОМЬЮ (а)	—0,14 (4 K)		0,21 (10 K)		1,9 (50 K)		8,2 (100 K)		14,5 (2[5 K)	[5]
1X15H30T2	—	—	—	16,1	16,7	16,9	17,5	—	—	— [5]
XH32T	13,7	15,6	17,2	18,0	18,0	18,4	18,9	19,0	–	– [37]
XH35BT	14,8	15,1	15,5	15,9	16,1	16,6	16,9	17,7	–	– [37]
XH35BTЮ	12,7	14,1	15,0	15,4	15,8	16,0	16,6	16,8	18,4	– [5[, 37]
X15H35B2M2TP	13,0	–	–	15,0	16,0	16,2	16,85	16,9	—	– [5]
X15H35B3TK4	—	14,8	15,2	15,65	16,1	16,5	17,05	—	—	– [5]
X15H35B5TP	14,1	–	–	15,8	16,2	16,2	16,7	16,9	–	– [5]
1X16H36MБTЮP	17,73	14,02	(373—473 K)		16,95	(673-773)		24,96	(973—1073 K)	[1]
X26H36K30MБ	—	–	13,5	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	16,0	– [5]
X16H38B3T	13,7	14,5	15,7	16,2	16,3	16,6	17,1	17,1	17,3	– [15]
OX17H39Б	14,2	16,0	17,2	17,2	17,2	17,5	17,8	—	—	— [5]
04XH40MДTЮ	8,15	11,0	12,0	12,8	13,6	14,1	19,9	16,2	–	— [1]
OX21H40БP	14,3	15,4	15,8	15,9	16,0	16,3	16,8	17,1	–	– [5]
X12H42MБT3	14,0				15,1		–	17,0	(300—1023 K)	[5]
XH45Ю	15,8	15,9	15,95	16^55	–	16,6	—	19,0	19,7	– [37]
X15H45K28M3T2Ю3	12,3	—			14,3	—	—	—	17,0	–
X22H45M9	13,9									16,3 [5
OX20H46Б	13,33	14,2	16,0	17,7	17,7	18,5	19,45	19,8	–	– [15
X15H51K20M5Ю5	11,9				14,3		–	–	17,7	– [5
X1Ш54K2M5ЮT2	12,4	13,1	13,6	14,0	14,3	14,5	15,0	15,7	16,8	18,1 [15
X20H54K16T2Ю1	12,4	—	—		14,7				17,4	— [5
X11H55M5K20T1	12,4									18,8 [5
X19H55K10M10T2Ю1	14,0	–	–		14,7				16,0	[5

Продолжение табл. 10.11

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
ХН55ВМКЮ	11,8	12,2	12,7	13,1	13,4	13,6	14,1	14,8	15,7	17,0	[37
ХН55ВМТКЮ	10,8	11,7	12.4	12,8	13,4	13,8	14,1	14,5	15,5	–	[37
ХН55МБЮ	10,0 (2	-300	K)		13,55 (200—300 K)		14,1 (2	(30-300	K)	–	
	–	–	14,1	14,3	14,5	15,1	15,5	16,3	16,3	–	51
ХН55МВЮ	13,4	14,2	14,9	15,2	15,8	16,2	–	17,3	18,8	—	37J
ХН56МВТЮ	11,7	12,0	12,4	12,7	13,0	13,5	13,8	14,5	15,2	–	37]
Х10Н56К20М5Т4Ю5	11,7				14,0	–	–	–	16,2	–	5]
Х20Н56К18Т2Ю1,5	11,6	12,6	12,7	13,5	13,7	14,2	15,0	16,0	17,0	—	5]
ХН57МВТЮ	12,6	13,6	14,7	15,0	15,3	15,8	16,2	17,3	18,2	–	37J
Х16Н57М17В4			–	—	13,3	—	–	–	11,8	—	[5]
Х15Н58М16	11,3									15,3	[5]
Х20Н58М10К10	12,5	–	—	—	14,3	–	–	–	**16,5**	–	[5]
Х20Н59К16Т2Ю1	12,8	–	—	–	15,1	–	–	–	17,9	–	[5]
ХН60В	12,7	13,2	13,6	14,1	14,5	15,5	15,7	16,0	16,2	16,8	[371
ХН60КМВЮБ	а , э	12,0	12,6	13,2	13,5	13,8 •	14,4	15,3	16,1	–	37]
ХН60Ю	12,28	13,08	13,42	14,2	14,22	14,59	15,11	15,18	15,88	—	37J
Х16Н60Ю3	12,3	13,1	13,4	14,2	14,40	14,6	15,1	15,2	15,9	–	5]
ОХ20Н60Б	12,55	13,6	14,4	14,8	15,1	15,5	15,6	16,2	16,7	–	5
ХН62ВМКТЮБ	13,5	13,5	13,5	13,6	13,6	13,9	14,5	15,6	—	–	3'
ХН62МБВЮ	12,0	12,8	13,3	13,5	13,8	14,5	14,8	15,5	16,4	17,3	3/
ХН62МЮК10	11,49	12,57	13,03	13,37	13,68	13,98	14,33	14,75	15,56	16,9	(37
ХН65ВМТЮ	11,5		12,3	12,75	13,0	13,2	14,0	14,3	15,0	–	[37
ХН67ВМТЮ	12,0		13,5	13,6	14,4	14,8	15,2	16,2	—	–	137]
Х18Н67В5М5Т2ЮР	10,4	11,1	11,7	12,0	12,5	12,8	13,6	13,8	14,9	–	[5]
ХН70ВМТЮ	12,0	12,5	13,5	13,9	14,3	14,8	15,8	16,3	16,7	—	[37
ХН70ВМТЮФ	10,4	11,7	12,4	12,9	13,2	13,6	14,0	14,5	15,0	–	[37
ХН70ВМЮ	10,2	11,3	12,0	12,2	12,4	12,6	13,1	13,2	14,0	15,1	[37
ХН70ВМЮТ	12,2.	12,65	13,2	13,6	14,1	14,55	15,1	15,8	–	—	[371
Х15Н70В6М3Т2ЮР	12,4	12,8	13,05	13,3	13,6	14,0	14,6	15,25	16,1	17,35	5]
Х15Н70В5М4Ю2ТР	12,2	12,6	13,2	13,6	14,1	14,5	15,1	15,8	16,5		5
Х27Н70Ю3	–	–	–	–	–	—	–	—	–	18	5
Х13Н7Ш5Б2Т1ЮБ	11,9	–	–	–	12,6	–	–	–	14,5	—	[5
Х15Н73Т2Ю1Б			13,1	14,0	14,5	14,9	15,6	16,4	–	–	[5
Х15Н73Т3Ю1Б1	13,7	13,9	14,2	14,4	14,6	15,0	15,4	16,2	16,8	–	[5
Х20Н75ТЮ	12,2	13,0	13,4	13,8	14,1	14,7	15,4	15,5	16,0	–	[5
ХН77ТЮР	12,67	12,9	13,3	13,8	14,2	14,6	15,1	15,5	16,2	16,8	[3
Х20Н77Т2Ю	11,9	12,7	13,0	13,5	13,7	14,0	14,5	15,1	15,8	–	[5]
ХН78Т	12,2	13,0	13,4	13,8	14,1	14,7	15,4	15,5	–	–	37]
Х16Н80ТБЮ	13,3	13,5	13,85	14,2	14,5	14,9	15,5	16,15	16,7	17,8	5]
Х20Н80Т	11,8	12,9	12,9	14,4	14,8	15,8	16,1	16,50	16,8	–	5]
Х20Н80Т3	11,9	**12,7**	13,0	13,5	13,7	14,0	14,5	15,1	15,8	–	5]
Х20Н80										17,6	5]
Х22Н47М9	13,8	—	—	—	14,9		—		16,8		5]
Хромомолибденовые істали											
12ХМ, 12МХ	11,2	12,5	12,7	12,9	13,2	13,5	13,8	—	—	—	[5]
15ХМ	12,2	12,95	13,3	13,7	14,0	14,3	14,5	13,35	11,15	12,45	[5]
20ХМ	11,8	12,5	13,0	13,6	14,0	14,3	–	–	–	–	5]
20ХМЛ	10,9	12,4	12,8	13,1	13,6	13,9	–	–	–	–	5]
20ХМФЛ	10,0	11,9	12,9	13,1	13,5	13,8	–	–	–	–	5
ЗОХМ, ЗОХМА	11,6	12,5	13,2	13,8	14,3	–	–	–	–	–	5
34ХМ, 35ХМ	12,3	12,6	13,3	13,9	14,3	14,6	–	–	–	–	5
35ХМФА	11,8	12,5	12,7	13,0	13,4	13,7	14,0	–	–	–	5
38ХМЮА	12,3	13,1	13,3	13,5	13,5	13,8	–	–	–	–	
12Х1МФ	12,4	13,0	13,6	14,0	14,4	14,7	14,9	14,8	12,0		[5]
15Х1М1Ф	11,2	11,7	12,5	13,0	13,5	13,7			–		[5,371
15Х1М1ФК1Р	12,1	12,5	**13,1**	**13,8**	**14,6**	14,9	**14,6**		–	–	[5]1
20Х1М1Ф1ТР		12,0	**12,3**	12,85	13,0	13,55	–	–	–	–	[5]
20Х1М1Ф	12,05	12,4	12,85	13,15	13,45	13,8	13,9	14,25	12,65	–	[5]1
25Х1МФ	**11,3**	11,7	12,8	**13,2**	**14,2**	14,4	–	–	–	–	[5]
25Х1М1Ф	10,9	12,0	**12,7**	13,65	**13,7**	13,8	14,0				[5]1

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	И/Я	1173	1273	
ш м	12,1	12,3	12,8	13,2	13,8	14,0		—	—	—	5[1
12Х2МБ, 1Х2МФБ	12,3	12,4	12,6	12,6	13,3	13,5	–	–	–	–	5
12Х2МФСР	11,85	12,9	13,55	13,95	14,35	14,8	15,15	15,5	12,4	–	5
15Х2М2ФБС	11,5	12,3	12,9	13,4	13,8	14,3	14,6	14,9	13,0	–	[5
25Х2М1Ф	12,5	12,9	13,3	13,7	14,0	14,7		–	–	–	[5J
Х3МВФБ	10,6	11,45	12,3	12,65	13,1	13,35	13,4	13,1	11,45	10,35	[5]
Х5М	11,3	11,6	11,9	12,2	12,3	12,5	–	—	–	–	[51
10Х7МВФБР	10,25	11,6	12,4	12,75	13,25	13,6	13,4	–	–	–	[37]
15Х11МФ	10,3	10,6	10,8	11,3	11,7	12,0	12,2	12,4	–	–	37]
18Х11ШФБ	10,3	10,6	10,8	11,3	11,7	11,8	12,0	12,4	–	–	37]
12Х12МВФБР	11,15	11,13	11,42	11,8	12,0	12,15	12,15	12,65	11,6	–	[37]
12Х12МВФБ	10,25	11,6	11,6	11,6	13,85	12,7	14,95	10,5	13,85	–	37]
12Х13М2С2	10,5	11,2	12,0	12,3	12,5	12,8	13,0	13,5	14,1	13,9	[5]
1Х13М2С1	10,2	10,8	11,3	11,7	12,0	12,4	12,6	13,0	13,0	13,6	5]
1Х13М2ФБР	9,7	10,6	11,5	11,6	11,8	12,2	12,2	12,6	12,4	12,6	[5]
15М, 16М, 20М	12,0	12,6	13,2	13,7	14,2	14,7					[5]
Марганцевые и хромомарганцевые стали											
	0,3 (30 К)		5,80 (ШОК)		10,0 (200 К)		11,9 (300 К)				
й "	10,5	11,8	12,6	13,1	13,7	14,0	–	–			
50Г	11,6	11,8	12,8	13,8	14,2	14,6	–	–			
65Г	11,11	11,9	12,9	13,5	–	14,6	–	–			
30Г2	11,9	12,7	13,4	13,9	14,3	14,7	15,1	13,6	13,7	14,5	
14Г2АФ (а)	0,035 (4,3 К)		0,23 (2 К)		9,05 (ШОК)		14,35(200 К)		15,85(300 К)		
ГЗ	18,0	19,35	20,7	21,7	20,75	19,85	20,5	21,85	23,45	23,15	
20ХГНР		11,7	12,7	13,5	14,0	14,3	15,2	–			
25ХГСА	13,15	13,9	14,05	14,3	14,85	14,9	15,1	–			
ЗОХГСА (а)	7,60 (Л ОК)		9,47 (1 0 К)								
	12,0	12,5	12,9	13,2	13,6	13,9					
Х12Г20Ф	15,4	16,9	17,5	18,2	18,9	19,7	20,5	–			
А3Х13АГ19 (а)	0,05 (10 К)		0,4 (40 К)		4,0 (100 К)		7,4 (200 К)		14,4 (300К)		
	13,85 1 16,80		18,70 11 19,40		20,40 11 21,80		21,8	22,5			
07Х13АГ20Н4 (а)	-0,2 (20 К)		3,0 (77 К)		15,3 (25й К)		–	–			
Х14Г14НЗТ	16,0 11 16,8		17,6 11 18,3		19,0 11 19,5		20,1	–			
10Х14Г14Н4Т (а)	0,502 (5ЮК)		5,05 (ШОК)		9,20 (5т К)		–	–			
	15,3 11 15,8		18,9 11 19,05		19,07 1 20,02		20,07	21,1			
Х15Г21Т	15,3	jl 16,6	17,8	18,9	19,6	20,3	20,9	21,5			
12Х17Г9АН4 (ее)	3,60 (50 К)		9,05 (100К)		14,1 (200 К)		14,6 (300К)				
07Х21Г7АН5 (-ж)	-0,03 (4 К)		—0,13 (20 К)		3.05 (70 К)		5,75 (ШОК)		15,7 (300К)		3, 46]
Хромовольфрамовые стали											
28ХВФЦ	11,8	12,1	12,8	12,85	13,2	—		—	—	—	
38ХВФЮА	12,25	12,9	13,1	13,35	13,75	14,1	14,45	14,1	11,6	–	
ЗХВ8Ф (а)	11,2										
20Х3ВМФ			—	12,3	12,75	13,8	—	—	—	—	
4Х4ВМФС (а)	11,44										
4Х4ВМФСШ (а)	11,62										
Х11В2ИМФ	10,5	11,2	11,9	12,6	12,8	13,1	–	–	–	–	
18Х12В,МБФР	11,5	11,13	11,42	11,8	12,0	12,5	12,65	11,6			
15Х12ВНМФ	10,0	10,5	10,7	11,0	11,2	11,5	11,6	11,8	10,7	11,e	
Х12В2,1Ф	10,8					13,5	–	–	–	–	
Хромованадиевые стали											
15ХФ	11,9	12,4	13,1	13,7	14,2	14,5	14,9	—	—	—	5]
40ХФА	11,0		12,9	–		14,5	–	–	–	–	5
50ХФА	11,8	12,4	13,1	13,6	13,9	14,1	–	–	–	–	5
12Х2ФБ	11,5	12,2	12,4	12,9	13,2	13,4	13,5	–	–	–	
70Х4Ф1В18	11,25	11,7	12,0	12,2	12,4	12,6	12,8	12,9	11,35	12,45	5

Продолжение табл. 10.11

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
Хромокобальтоеые стали и сплавы											
15К, 20К	—	12,0	12,8	13,2	13,5	13,85	—	—	–	–	[5]
22К, 25К (а)	—	12,2	13,0	13,3	13,9	–	–	–	–	–	[51
ВЗК стеллит, наплавочный материал	–	–	–	–	–	14,0	–	–	–	16,0	[51
ОЗХ9К14Н6М3Д (а)	0,03 (4К		-0,08	9К)		0,3 (2(Ж)		4,4 (70К)	7,4 (110К)	13,2 (3ООК)	[51,52]
40К19Х14Н20М4В4Б4	—	—	14,25	14,5	14,75	15,1	15,4	15,75	—		[5]
15К20Х20Н20М3В2Б			15,55	15,95	16,3	16,65	17,05	17,55	–	–	(5[
40К20Х20Н20М4В4Б4			15,15	15,25	15,35	15,45	15,7	16,1	16,65	–	[5]
40К30Х20Н20М8В4	—	—	13,7	14,2	14,65	15,05	15,45	15,95	16,55	–	[5]
75К41Х23Н20В12			14,2	14,3	14,55	14,85	15,25	15,9	–	–	
40К44Х19Н10В15			14,5	14,65	14,85	15,25	15,7	16,25	16,9	–	
40К44Х20Н20М4В4Б4			17,7	17,55	17,55	17,55	17,6	17,65	17,75	–	15]
12К5ІХ20Н10В15			13,65		14,65	15,3	15,85	16,3	–	–	[
40К51Х24Н16М6			13,9	14,05	14,2	14,4	14,7	15,1	15,5	–	(5
40К55Х25Н10В8			14,05	14,4	14,9	15,5	16,35	16,7	16,75	–	15
40К65Х23Н2В6			13,7	14,15	14,55	15,05	15,65	16,3	–	–	15
25К65Х25Н2М5			14,05	14,25	14,55	14,85	15,4	–	–	–	15
125К65Х27В4С3	–	-	14,5	14,65	14,85	15,25	15,7	16,25	–	–	[5]
Кремн,хтые стали											
ЗОХС, 37ХС, 40ХС	11,7	12,7	13,4	14,0	14,4	14,5	—	—	—	–	!5
15ХСМБ	10,11	11,72	12,17	12,64	13,98	13,65	–	–	–	–	[5
15ХСМФ	11,84	12,12	12,43	12,60	12,93	13,13	–	–	–	–	[5
схем	11,0				12,0	12,2	12,35	–	–	–	[5
60С2А	12	1^8		13,5	13,4	–	–	–	–	–	[5
50С2Г	11,2	12,2	12,9	13,4	13,7	14,1	14,4	13,6	13,7	14,5	[5]
Титановые и другие стали и сплавы											
48ТС-1, 48ТС-2, 48ТС-3	–	–	11,9-12,6 (300—573К)			–	–	-	–	–	[5]
15Х25Т	—	10,0	10,6	10,8	11,3	11,5	11,6	11,6	12,2	12,2	
ХВГ	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	14,5	–	–	–		
Э (Армко)		11,7	12,99	13,71	14,15	–	–	–	–	–	5
Э1	10,8	12,6	13,8	14,6	14,8	14,3	14,3	–	–	–	5
Э5	10,6	11,8	13,0	14,0	14,7	15,3	15,6	–	—'	–	5
Э14		11,7	12,7	13,7	14,7	15,6	15,4	–	—'	–	5
Э16	7,0	10,7	13,1	14,3	14,6	14,3	13,2				5

Таблица 10.9. Температурный коэффициент линейного расширения цветных металлов и сплавов
Приведены значения истинного ТКЛР а (при данной температуре Г) или среднего ТКЛ? а в интервале АГ)

Вещество	*Т, АТ, "С*	*а, а,* 10⁶ К-"	Вещество	*Т, АТ, "С*	
Бронза [3, 5, 29, 46]					
Бр. А5	20	18,2	Бр. КН1-3	20	16,1
Бр. А7	20-300	17,8	Бр. Мг0,3	25-300	17,6
Бр. АМц 9-2	20	17,0	Бр. 010	20	18,5
Бр. АЖ 9-4	—200	10,5	Бр. ОС 8-12	20	17,1
	20	17,1	Бр. ОС 5-25	20	17,6
	20-300	19,0			

Вещество	*т*, дг,	к. 10-«, к-'	Вещество	*Т*, дг, с	**G, a,** 10-» К-'
Бр. АЖМц 10-3-1,5	-200	11,9		-200	12,5
	20	17,0	Бр. ОФ 10-1	20	17
	20-400	20		400-	22
Бр. АЖН 11-6-6	20	14,9			
Бр. АЖН 10-4-4	-200	11,4	Бр. ОФ 7-02	20	17,5
	20	17,0		400	19
Бр. Б2	-250	11,5	Бр. ОФ'6,5-0,4	20	17,1
	-100	15,6		20-300	19,1
	25	17,0	Бр. ОФ 4-0,25	20-100	17,6
	200-300	19,0		20-400	19,4
Бр. Кд1	20	17,6	Бр. ОЦ 10-2	0-100	18,3
Бр. КМц 3-1	-200	11,1	Бр. ОЦ 8-4	20	16,6
	20	18,5		20-180	18
	20-300	18	Бр. ОЦ 4-3	20	18
Бр. ОЦС 4-4-25	20	18,2	Бр. ОЦС 6-6-3	20	17,1
	20-500	19,0		300	18,2
Бр. ОЦСН 3-7-5-1	20	17,1	Бр. СЗО	20-260	18,4
Бр. Х0,8	-170	10,5	Сплав ХОТ	20-300	17
	20	16,7	**Бр. Цр 0,4**	20-100	16,32
Бр. Х0,5	-200	11,7		20-300	17,90
	20	17,6		20-600	19,80
			Латунь *[Э*1, 5, 29, 46]		
Л56	20—300	18,1	ЛАЖ 60-1-1	20	21,6
Л59	20	21	ЛАН 59-3-2	20	19
Л62	-200	14,1	ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5	20	**18,3**
	20-100	19.0	ЛАЖМц 66-6-3-2		**19,8**
	20-300	2о;б	ЛЖМц 59-1-1	-200	13,0
Л63	-200	14,1		20	22
	20	20,4	ЛК80	20	19,2
	20-300	20,6	ЛК80-3Л	-190	13,8
Л66	25-300	20,1		20	19,1
Л68	-250—20	13,5		20—300	17
	-100-20	17,2	ЛН 65-5	20	18,2
	20-100	18,5	ЛМц 58-2	20	21,2
	20—300	19,9	ЛО 90-1	20—100	18,4
Л70	20-300	19,9	ЛО 70-1	20	19,7
Л75	20—300	19,6		20-300	19,9
Л80	20	18,8	ЛО 62-1	20	19,3
	20-300	19,1	ЛС 74-3	20	17,5
Л85	20-100	17,7		20-300	19,8
	20-300	18,7	ЛС 64-2	20	20,3
Л90	20-100	14,4	ЛС 63-3	20	20,5
	20—300	18,2	ЛС 60-1	20—300	20,8
Л96	20	17	ЛС 59-1	-200	13,9
	20-300	18		-100	18,3
ЛА 85-0,5	20	18,6		20	20,6
ЛА 77-2	20—300	18,5			
			Магниевые сплавы [47]		
ВМ 65-1	20-100	20,9	МА5	20-100	26,1
	100-200	22,6		200-300	28,5
ВМ17	20-100	22,67	МА8	20-100	23,7
ВМДЗ	20-100	25,9		200—300	32,1
	200-300	30,6	МА9	20—100	25,5
МА1	20-100	23,1		200—300	32,3
	200-300	32,1	МАП	20-100	25,7
МА2	20—100	26,0		200—300	30,1
	200-300	29,5	МЛ2	20—100	26,6
МАЗ	20-100	26,0		200—300	27,7
	200—300	31,2			

Вещество	*m,* дг, -с	а, а, 10-' К"»	Вещество	*Т, &Т.* "С	а, а. 10-« к->
МЛ4	20—100	26,4	МЛЮ	20—100	27,4
	200—300	28,3		200-300	
МЛ5	20—100	26,8	МЛН	20-100	21^9
	200—300	28,7		200-300	24,8
МЛ6	20-100	26,1	МЛ12	20-100	26,2
	200-300	***2IJ***		200-300	31,1
МЛ9	20-100	23,4	МЛ15	20-100	25,9
	200—300	32,7		200—300	27,9
		Никелевые сплавы [3, 5, 29, 46]			
МН16 (ТБ)	20	15,3		—173	6,52
МН19	20	16		—73	10,0
МН95-5	20	16,4		20	10,4
МНЖ 5-1	20	13,7	38НК	-100-20	4,30
МНМц 43-0,5, копель	20	14,0		—60—20	3,90
	20-600	16,8	34НК	-100—20	8,00
	20-1000	18,8	33НК	—100—20	8,60
МНМц 40-1,5		14,4		—70—20	10,0
МНМц 3-12	100	16	29НК	—100—20	6,30
МНЦ 15-20, нейзильбер	20-100	16,6		—70—20	6,50
НМц5		13,7	38НКД	-100-20	7,20
НМц2,5	–	13,4	32НКД, инвар	-60-20	0,90
НМцАК 2-2-1, алюмель	20	13,7	**30НКД**	— 100—20	5,40
НМЖМц 30-1-1, мельхиор	25—300	16	37НКДП	20—100	10,9
НМЖМц 28-2,5-1,5, мо-	20-100	14,2		20-500	12,2
нель	25—300	14,9	40НКМП	20-100	11,0
	20-600	16,1		20—500	12,1
НХ9,5, хромель	0-1000	12,8	**35НКТ, инвар**	-100-20	2,3
НХ9, хромель А	20	12,8		-60-20	2,2
	0—1000	12,8	35НКХСП	20—100	10,8
Н65М28, хастеллой	20-300	11,1		20-500	11,8
	20-500	11,8	80НМ	20-100	12,2
	20-1000	15,2		20-500	14,5
Н64М28	20-100	10,0	79НМ	20—100	10,5
	20—1000	14,6		20-500	12,7
78Н	20-100	12,0	77НМД	20-100	12,7
50Н	20-100	8,9		20—500	14,9
	20—500	9,4	8ШМТ	20—100	11,8
46Н	-100-20	7,7		20-500	13,5
45Н	20-100	8,2	65НП	20—100	11,8
	20—400	7,7		20—500	13,2
	20-500	9,0	36НХ, инвар	—269	—0,5
42Н	-100-20	4,9		—263	-1,3
36Н, инвар	-100-20	1,10		—253	— 1,6
49НД, ковар	— 100	10,6		—223	—0,2
	20	4,50		— 173	1,9
47НД	-269	0,005		-73	1,9
	-263	0,02		20	1,9
	-253	0,12	76НХД	20-100	11,8
	—233	1,20		20-500	14,5

Легкоплавкие сплавы и припои [3, 48, 49]

ПМЦ36	22	99Pb1Sb
ПМЦ48, ПМЦ54	21	85Pb15Sb
50Pb50Sn	25,5	

Продолжение табл. 10.11

Тугоплавкие сплавы [3, 5, 20, 57]

АТ2	20	8,72	11 ОТ4-1	25	8,0
ВР20	200	4	ТВI	20	8,74
ВТ3	20	8,55	ТВ-10	20	6,34
ВТ3-1	20	8,52	40Nb60V	20	8,27
ВТ5	20-700	10,5	50Nb25V25Zr	20	7,85
ВТ5-1	20	9,15	WC + 5,9%Co	20-100	4,5
ВТ6	20	9,10		20-400	5,2
ВТ8	20	8,6	W +0,015% Mo +	20-100	4,3
	20-300	9,8	+ 0,005% Cu +	20-500	4,6
	20-800	10,25	+ 0,002% As		
ВТ14	20	8,48	60W40CU	20-100	8,0
ВТ15	20	8,30		20-700	10,2
			1 98,8Zr1,2Hf	20	6,28

Сплавы урана и плутония [3, 5]

Сплавы и—А1			Сплавы U—Zr		
АМ		13,8	Zr5		14,5
А12		14,1	Zr70		
Сплавы и—Сг			Сплавы Pu—**AI**		
&5		14,5	98% AI	40—600	
Cr50		10,4	90% Al	40-600	25,7
Ct70		8,52			

Таблица 10.10. **Температурный коэффициент линейного расширения алюминиевых сплавов. Приведены значения истинного ТКЛР а (при данной температуре Г) или среднего ТКЛР "х (в интервале ЛГ)**

Марка					
А132	20-100	19,0		20-100	22,5
	20-200	**20,0**		20-200	23,4
	20-300	21,0		20–300	24.8
АВ	20-100	23.4	АЛ1	20-100	22.3
	20-200	24.5		20-200	23.2
	20-300	25.4		20-300	24.4
АД, АД1	-200	6,10	АЛ2	-200	7,20
	-100	18.6		-100	15,7
	20-100	23.5		20-100	21,1
	20-200	24.6		20-200	22,1
	20-300	25.6		20-300	23.3
АДЗЗ	–200-20	**18,0**	АЛ3	20-100	**22,0**
	–100–20	20,9		20-200	23,2
	20-100	23.2		20-300	24.0
	20-300	25.0	АЛ4	20-100	21,7
АК4	**-173,2**	16,4		20-200	22.5
	20-100	22		20-300	23,5
	20-200	23.1	АЛ5	20-100	23.1
	20-300	24		20-200	23.9
АКБ	**-200**	7,60		20-300	25.2
	-100	16,0	АЛ6	20-100	21,5
	20-100	21,4		20-200	22,5
АК7	-200-20	16,6		20-300	23.5
	-100-20	19.3	АЛ7	20-100	23,0
АК8	**-200**	3,02		20-200	24,0
	-100	17.7		20-300	25,0

Продолжение табл. 10.11

	— 173,2	18,3
	20-100	24,5
	20-200	25,6
	20-300	23,3
АЛ9	—200	8,60
	-100	18,2
	20-100	23,0
	20-200	24,0
	20-300	24,5
АЛ10В	20-100	22,3
	20-200	23,3
	20-300	25,4
АЛ11	20-100	24,0
	20-200	24,4
	20-300	26,6
АЛ12	20-100	22,0
	20-200	23,0
	20-300	23,5
АЛ13	20—100	20,0
	20-200	24,0
	20-300	27,0
АЛ19	— 173,2	16,4
	20-100	19,5
	20—200	21,9
	20-300	25,6
АЛ21	20-100	22,9
	20—200	24,6
	20-300	27,8
АЛ22	20-100	24,5
	20-200	25,6
	20-300	27,3
АЛ25	20-100	19,0
	20—200	20,0
	20—300	21,0
АМг2	20—100	23,8
	20-200	24,5
	20—300	25,4
АМгЗ	— 193,2	9,2
	-100	18,3
	20-100	23,5
	20—300	25,5
АМг4	—200	7,5
	—100	18,5
АМг5	—200	4,82
	—100	18,9
	20-100	23,9
	20-200	24,8
	20—300	25,9
АМц	— 193,2	6,05
	-100	16,8
	20-100	24
	20-200	24,8
	20-300	25,9
	-200	7,01
	—100	17,7
	27	22,6

Марка	*т. АТ,* с	=, а, 10-«
В92	—200	16,5
	-100	21,4
В93	20-100	24,1
В94	20—100	21,9
В95	-200	4,23
	-100	18,4
	20-100	23,2
	20-200	24,3
	20-300	25,9
В65	-193,2	19,9
	-100	22,3
В14А	20-100	18,1
ВЗОО	20-100	22,9
	20-300	27,8
ВиИ-З	20-100	25,5
	20—200	25,6
	20-300	27,3
ВАД-1	—200	16,4
	-100	19,3
ВД17	-200	12,0
	—100	18,3
Д1	-200-20	21,8
	-100-20	21,9
	20-100	22,9
	20—200	23,4
	20-300	24,8
Д16	-200	14,6
	—100	17,0
	20-100	22,7
	20-200	23,4
	20-300	24,8
Д18, Д18П	—200	10,0
	—100	18,9
	20-100	22,7
	20-200	23,4
	20-300	24,8
Д20	—200	7,10
	—100	18,5
АМ8	20—100	22,8
АЖ6	20-100	23,0
АМК2	20-100	25,7
АСС-5	20-100	23,9
АСМ	20-100	24,0
АН-2,5	20-100	25,0
САС1	—223	6,05
	—73	11,8
	20	12,9
Сплав 1915	-200	7,52
	— 100	18,2
	27	22,7
Сплав 1201	—200	5,7
	—100	17,7
	7	22,1

Таблица 10.11. Температурный коэффициент линейного расширения пластмасс. Приведены значения истинного ТКЛР *а* (при данной температуре *Т*) или среднего ТКЛР а (в интервале Д7")

	Т, АТ, 'С	10-° К"»
Аман	—	1,0-2,0
Аминопласты	—	2,5-5,3
Анид	–	10
А ф рмальдегидные полимсоы		5-6
	-200-20	4,5
	-70—20	6,7
	0	7,6
Болокнит	—	3-3,5
Дифлон	—	6
Капролон	—	6,6—9,8
Капрон А, Б, В		12—14
Капрон стеклонаполнен-	–	10—12
Кремнийорганические полимеры	-	0,5—2,0
Лавсан	—	2,6-2,7
Меламинформальдегидные полимеры	–	4,0
Мегаллополимер для литьевых форм	27	3,0
Мочевиноформальдегидные полимеры	-	2,7
Нейлон	-263-20	4,3
	—233—20	4,6
	-173-20	5,2
	-73-20	5,4
	-7-20	4,0
Пенопласт ПВ	30	3,9
ПС	20	5,2-8,4
ПС-1	30	5,05
ПС-4	30	6,2
ПСБ	30	5,5
п е в		5,5-6,8
Пенопласт полиуретановый ПУ	20	5,0
ПУ-101	40	6,6
Пенопласт полихлорвиниловый ПХВ-1	30	4,6
Пенопласт		2,7-7,9
Пен тон	—	7,8—8,0
Полиамид-6	—	8,2-9,7
-12		9,6-10
-66	—	9,9
-68	20	6,0
-68 с графитом	—	10-20
•68ВС	—	10-12
•681-40	—	4,5-4,8
−681−60	20	3-3,5
-548, -54	—	13
•Н, -С		12
-АК7	—	10-11
Полиарилат	—	6
Полибутилен терефталат	—	13
Поливинилбутил ПВБ	—	9,2
Полнвинилбутилфталат ПВБФ	–	13
Поливинилбутилэфир	—180	9,0
	-80	13,0
	0—20	22,0

[55

Продолжение табл. 12.12

	Т. ДГ, "С	10-V
Пол ив ин илвторбутилэфир	-180	6,6
	-80	10,7
	20	21,4
Поливинилгексилэфир	-180	6,5
	−80	19,5
	-60	29,5
Поливинилдесилэфир	— 180	8,2
	−80	15,8
	—	22,6
Поливинилиденфторид	—	8-12
Поливиинилизобутилэфир	-180	7,0
	-80	11,4
	20	21,0
Пол ивин илизопропилэфир	— 160	8,8
	-80	9,0
	20	22,1
Поливин илкарбазол	—	4,0
Поливинилметилэфир	−180	5,2
	−80	6,9
	20	22,4
Поливиниловый спирт		7-12
Полив ин илоктилэфир	— 180	7,1
	−80	12,5
Поливинилтолуол		7,5
Поливинилфталат		5,4
Поливин илфторид	—	5
Поливинилхлорид (винипласт)		6-9
листовой ВМЛ-25	-50^-10	6,7
	10−30	2,8
		3,9
Поливинилэтилэфир	-180	8,1
	-80	9,5
	0	24,0
Пол идиметилстирол		7,9
Полихлорстирол	—	7,0
Поликарбонат		6-7
Пол иметил акрил ат	Z	8
Полиметилметакрилат:		
оргстекло ПА-200	-200	2,7
	-50	5,7
	0	7,7
	20	8,8
оргстекло СОЛ	20	7,1
оргстекло СТ-1	80	12,5
	20	7,7
оргстекло 2-55	100	11,1
	20	7,3
Полиметилсилоксан	-200	6,8
ПМС	−100	8,5
	20	10,0
Полиметилпентен	—	1,2
Полиметилфенилсилоксаи ПМФС-1	−200	5,4
	-100	6,7
	20	10,0
Полиметилфенилсилоксан ПМФС-2	−200	7,2
	-100	8,5
	20	14,0
Полиоксиметилен	—	8,1
Полипропилен стеклонаполненный	0−100	И 1,9

Продолжение табл. 10.11

	m. Д7-,	10-' К"'	
Полистирол блочный		6—8	
МС	—	7—8	
м е н	—	6 - 9	
СА	–	7,4	
САМП		7,5	
СВ		8,5	
светотехнический		6 - 7	
Полистирол СН	—	8,6-9,5	
ударопрочный СНП-2	—	8,6	
ударопрочный	–	7,0	
ударопрочный УП-1Э	—	7,0	
Полистирольный пластик АСБ	–	8-10	
Полисульфон	-	5,6	[55]
Политетрафторэтилен:			
Фторопласт-4(р = = 2,3 кг-м-з)	-263-20	7,1	[3]
	-233-20	7,7	
	-173	3,6	
	0	11,5	
Фторопласт-4, ГОСТ 10007—80	120—200	15	
	210—280	21	I48J
Фторопласт-4М		9	129J
Фторопласт-40		6,2-9	[29]
Фторопласт-42		9,7—26	129J
Фторопласт-40П	0	11,3	13
Политрихлорфторэтилен (Фторопласт-3)	-263-20	3,96	
	-233-20	4,26	
	-173—20	4,74	
	-73-20	5,29	
	20	5,57	
	120	10	
Полиуретан ПУ-1	—	13,5	
Полифен оксид		1,6-3,4	
Полифенилсилоксан ПФС	-200	4,5	
	-100	5,7	II
	20	7,0	[3
Полиформальдегид	—	7,9-8,1	15 .
Полихлорстирол	–	7,4	129J
Полиэтилен:			
	0-100	22-55	29]
LA	0—100	11—50	29
Полиэтилен СД		10-55	
Полиэтилен (усредненные для ПЭ различных плотностей)	-263-20	7,2	
	-233-20	8,0	129
	-173-20	9,96	
	-73-20	18,3	
	20	34,0	
		20	
П<			
10 %	20	7,0	
20 %	20	5,2	
40% с	20	3,0	
П<	-100	5,0	
	0	6,6	
Премиксы		3,2-4,0	
Пресс-материал ниплон	–	5,0	
Пресс-материал фенилон	—	3,1-3,5	
Пресс-материал на фенопластах	–	1-2,5	
Стекловолокнит **В,** прес-	25-200	1,24	

Продолжение табл. 10.11

Название	*Т. АТ.* °С	10» к-1	Литература
Стекловолокно	20-80	0,9—1,2	[53]
	80—160	0,4—0,8	[53]
Стеклолента:			
вдоль нитей	25-100	5,0	4!
поперек нитей	25-100	8,5	4!
Стеклопластики	—	0,5-1,2	5!
Стеклотекстолит ВФТ-С	20-100	0,8	[4!
КАСТ-В	20—100	0,9	[4
Текстолит листовой А-50	—233	0,55	3
	-173	1,25	3
	-73	1,8	3
	0	2,5	is
Фенолформальдегидные полимеры	–	2,5-6,0	[2
Фенолформальдегидные полимеры ударопрочные	—	3,0—3,5	[53]
Фенолформальдегидный клей ВФТ-С	—210—20	3,98	3]
	— 173—20	4,35	3]
	-73-20	5,21	3
	20	5,97	3
Шеллак	< 4 6	9	5]
	> 4 6	4,4	[53]
Эпоксидные полимеры диановые циклоалифатические	—	5,5—6,5	[29j
	–	4,6-5,0	[29]
Эпоксидные смолы	—	3,5—4,0	53]
Эпоксидный клей, К-9	-200-20	7,0	3]
	—70—20	8,01	3
	-10—20	8,75	3
ЭПК-1	-200-20	5,16	3
	—170—20	5,64	3
	—70—20	7,05	[3
	20	7,74	[3
К-63А	-170	3,52	[3
	-70	4,92	[3]
	20	6,0	[3]
Эпоксидный материал КЭП	20—150	2,6	[5;
	150-200	5,6	[53]
Эпоксититанкремний органический полимер с ситалловым наполнителем	—200—20	1,4-4,5	[3]
Этрол:			
ацетилцеллюлозный 2ДТ-43		10—12	[291
ни гроцеллюлозный	–	6,7	
этилцеллюлозный		10—14	[29]

Таблица 10.12. **Температурный коэффициент линейного расширения *а*, Ю'» К^^ строительных материалов при** 20 °С [3, 4, 16]

Аглопорит:	
А-1	5,8
А-2	3,2
Аглопоритобетон	5,5
Асфальт	200
Бакелит	28
Бетон:	
тяжелый	

	9.5
	8.6
на известняке	6,8
на керамзите	8,8—9,5
на шлаке	7,8—9,5
на перлите	9,5
на вермикулите	14,1
на диатомите	11,3
Битум БНД 90/130 (-30° С)	310
Бумага твердая	10
Газозолобетон	6,2-7,4
Глина	
Гранит:	
серый среднезернистый	8,3
истый	7.1
ИСТЫЙ	5.2
Диабаз:	
	7.05
	6.6
	9.3
С-2	4.8
С-21	3.4
Б-10	9.3
Б-12	9,1
Дерево:	
бук	2,57
дуб	4,92
сосна	5,41
ясень	9.5
Древесностолистый пластик (ДСП)	3—30
Золобетон	9.1
Известняк:	
С-3	6,0
С-4	5.4
К-1	7.4
Я-7	6.5
Керамическая плитка облицованная	5.9
Керамзит:	
К-1	6,1
К-2	4.2
Керамзитобетон	5,5-6,9
Кирпичная кладка	4,0
Коксы:	
прокаленный КНПС	2,5-3
непрокаленный КНПС	15—19
полукокс КНПЛ-3	
Мрамор	
Пек:	
каменноугольный	36-45
нефтяной	45
Пемза:	
природная	5,6
шлаковая	8,1—9,7
Пеностекло	10,8
Песчаник:	
П-1	10,4
П-2	10,2
Перлит вспученный	
Перлитобетон	
Раствор:	
цементно-песчаный № 1, 2, 3	10,4
керамзитовый, состав по объему 1:2,5	8,1
перлитовый, состав по объему 1:2,5	9,0

Продолжение табл. 10.11

Раствор из портландцемента на г	
состав по массе:	
1:1	11—13,3
1:2	10,1
1:3	11,2
1:6	9,2-10,4
на кварцевом песке	9,5-11,2
на доломите	11,4
на известняке, состав по массе 1	9.5
Термозитобетон	9,15
Туфолава	7.6
Фибра	9,0
Шифер	20
Цементный камень глиноземистый	6.7
Эбонит вспученный	

10.3. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ (табл. 10.13)

Таблица 10.13. **Температурный коэффициент объемного расширения газов и жидкостей при нормальном давлении** [16], **Приведены значения истинного коэффициента объемного расширения р (при данной температуре** *Т)* **или среднего коэффициента объемного расширения р (в интервале** *\Т)* **(ж — жидкость, г — газ)**

Вещество	Состояние	*Т,* *АТ,* К	10-» к-'
Элементы и неорганические соединения			
Азот	Ж	68-89	5,88
	Г	373	з!670
Алюминий	Ж	935-1373	0,113
Аммиак	Ж	223	1,93
	г	373	3,808
Аргон	ж	84-90	4,5
	г	373	3,676
Бром	ж	293	1,132
Висмут	ж	544-903	0,122
Вода (на линии насыще-	ж	273	-0,064
ния)	ж	283	0,070
	ж	293	0,182
	ж	323	0,449
	ж	373	0,752
Водород	ж	14-20.39	12,6
	г	373	3,659
Водород хлористый	г	273	3,769
Водород цианистый	ж	259	1,95
Галлий	ж	373	0,121
	ж	473	0,1143
	ж	673	0,1066
	ж	1173	0,0973
Гелий	ж	4,2	137
	г	373	3,658
Гелий-3	ж	3,2	580
Дициан	г	273	3,96
Йод	ж	380-423	0,80
Кадмий	ж	595-817	0,137
Калий	ж	373	0,280

Продолжение табл. 10.11

Вещество	Состоя-	*т. АТ, к*	V '
Кислород	Ж	68-89	3,85
Кремний четыреххлористый	Ж	293	1,430
Криптон	Г	373	3,311
Литий	Ж	458-508	0,174
Магний	Ж	923-1073	0,380
Натрий	ж	373-453	0,275
	ж	373-973	0,390
Неон	Г	373	3,659
Озон	ж	90	2,0
Олово	ж	505-673	0,106
	ж	505-1873	0,100
Ртуть [59]	ж	323,15	0,18190
	ж	373,15	0,18245
	ж	573,15	0,18677
	ж	1073	0,188
Рубидий	ж	313-413	0,339
Свинец	ж	601-1098	0,120
Сера	ж	388	0,430
	ж	425	0,490
	ж	438	0,170
	ж	483	0,344
	ж	630	0,388
Серебро	ж	1236-1373	0,111
Серная кислота	ж	293	0,576
Сероуглерод	ж	293	1,218
Серы двуоксид	ж	223	1,70
Таллий	ж	573-626	0,150
Углерода двуоксид	г	223-273	4,95
	г	273-373	3,723
Углерода оксид	ж	68—81	4,91
	г	273-373	3,669
Фосфор	ж	323-333	0,52
Фосфор трехбромистый	ж	293	0,868
Фосфор треххлористый	ж	293	1,154
Фосфора хлороокись	ж	293	1,116
Фтор	ж	55-85	3,0
Хлор	ж	172-239,4	1,41
Цезий	ж	303-325	0,341
Цинк	ж	693-816	0,147
Органические соединения			
Азотноэтиловый эфир	ж	293	1,299
Аллил бромистый	ж	293	1,241
Аллил иодистый	ж	293	1,091
Аллил хлористый	ж	293	1,475
Аллиловый спирт	ж	293	1,049
Амил бромистый	ж	293	1,102
Амил иодистый	ж	293	0,986
Амил хлористый	ж	293	1,208
Амилацетат	ж	293	1,162
Амиловый спирт	ж	293	0,902
Анилин	ж	293	0,858
Ацетилен	Г	273-373	3,739
Ацетонитрил	ж	293	1,301
Бензоил хлористый	ж	293	0,880
Бензойноамиловый эфир	ж	293	0,848
Бензойноэтиловый эфир	ж	293	0,900
Бензол	ж	293	1,237
Бутан	ж	253-303	2,0
Бутиловый спирт	ж	293	0,950

Продолжение табл. 10.11

Вещество	Состоя-ние	г, *АТ,* к	
Глицерин	Ж	293	0,505
Диаллил	ж •	293	1,357
Диаллиловый эфир	Ж	293	1,346
Диизопропиловый эфир	ж	293	1,452
Диметилсульфид	ж	293	1,082
Дипропиловый эфир	ж	293	1,354
Диэтилкетон	ж	293	1,233
Диэтилоксалат	ж	293	1,136
Диэтилсульфид	ж	293	1,278
Изогексан	ж	293	1,445
Изомасляная кислота	ж	293	1,068
Изопентан	ж	293	1,680
Изопрен	ж	293	1,570
Изопропиловый спирт	ж	293	1,094
Капроновая кислота	ж	293	0,975
пора-Ксилол	ж	293	1,02
орто-Ксилол	ж	293	0,97
мета-Ксилол	ж	293	0,99
Масляная кислота	ж	293	1,063
Метилацетат	ж	293	1,427
Метил бромистый	ж	293	1,684
Метил иодистый	ж	293	1,273
Мегиловый спирт	ж	293	1,199
Метилформиат	ж	293	1,563
Мстилэтилкетон	ж	293	1,315
Муравьиная кислота	ж	293	1,025
Неопентан	ж	293	1,6
Олеиновая кислота	ж	293	0,721
Пентан	ж	293	1,605
Пропан	ж	205-243	1,9
Пропан бромистый	ж	293	1,447
Пропан иодистый	ж	293	1,102
Пропан хлористый	ж	293	1.591
Пропиловый спирт	ж	293	0,956
Пропионовая кислота	ж	293	1,102
Толуол	ж	323	1,138
Уксусная кислота	ж	293	1,071
Фенол	ж	293	1,090
Хлора ль	ж	293	0,934
Хлороформ	ж	293	1,273
Этан	ж	143—200	2,4
Этилбензол	ж	293	0,961
Этил бромистый	ж	293	1,418
Этил иодистый	ж	293	1,179
Этил хлористый	ж	293	1,709
Этиленгликоль	ж	293	0,6375
Этиловый спирт	ж	293	1,120
Этиловый (диэтиловый)	ж	293	1,656
Этилформиат	ж	293	1,417
Смеси			
Бензин Б-70	ж	313	1,496
	ж	423	1,752
Воздух	г	273—373	3,670
Керосин Т-1	ж	293	0,955
Масло машинное МС-20	ж	303	0,638
Масло машинное МК-22	ж	323	0,886
Масло трансформаторное	ж	273	0,680
	ж	393	0,740
Петролейный эфир	ж	293	2,26

список ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974.

2. Свойства элементов; Справочник. — 2-е изд./Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1976.

3. Новицкий **Л.** А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. ~ 2-е изд. М.: Машиностроение. 1982.

4. Новицкий **Л.** А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение. 1975.

5. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник/Под ред. Б. Е. Неймарка. М.-Л.: Энергия, 1967

6. Petrenko N. S., Popov V. P., Puskarev E. A., Finkel V. A.//Phys. Stat. Solidi (b). 1975. Vol. 68. № 2. P. K145—K160.

7. Гешко Е. И., Михальченко В. П., Шарлай Б. М.// Физика твердого тела. 1972. Т. 14. С. 1803—1804.

8. Shouten D. R., Swenson C. A.//Phys. Rev. B, Solid Stat. 1974. Vol. 10. Л» 6. P, 2175—2185.

9. Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов: Справочное пособие//Под ред. Р. А. Нилендера. М.: Энергия. 1973.

10. Петренко Н. С., Попов В. П.//Физ. низких температур. 1979. Т. 5. № 3. С. 301—304

11. Сирота Н. Н., Жабко Т. **Е**.//Докл. АН СССР. 1977. Т. 236. №5. С. 1120—1122.

12. Crosse R. e. a.//J. Phys. 1978. Vol. СП. № 1. P. 45-53.

13. Handbook of Optics/Ed. W. G. Driscoll. N. Y.—Toronto, 1978.

14. White G. K./High Temp.—High Press. 1979. Vol. 11. № 4. P. 471-475.

15. Финкель В. А., Смирнов Ю. И., Воробьев В. В.// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 51. № 1. С. 32.

16. Таблицы физических величин: Справочник. — 1-е изд./Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат. 1976.

17. Оптические материалы для инфракрасной техники/Е. М. Воронкова, Б. И. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. М.: Наука. 1965.

18. Bland J. A.//Canad. J Phys. 1959. Vol. 37. № 4. P. 417-421.

19. Barnes J. O., Ragene J. A.//Phys. Lett. 1974. Vol. 46А. № 5. P. 317—318.

20. Рябцев Н. Г. Материалы квантовой электроники. т.: Сов. радио. 1972

21. Материалы, используемые в полупроводниковых приборах/Под ред. К. Хогарта: Пер. с англ. М.: Мир.

22. Материалы для оптоэлектроники: Сборник статей: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.

23. Rapp J. **E**., Merchaut H. **D.//J.** Appl. Phys. 1973. Vol. 44. № 9. P. 3919—3923.

24. Титаиат бария: Сборник статей/Под ред. Н. В. Белова. М.: Наука. 1973.

25. Сирота Н. Н.//Химическая связь в полупроводниках и термодинамика. Минск: Наука и техника. 1966.

26. Бойко А. А., Головин В. А.//Кристаллография. 1970. Т 15. № 1. С. 186—189.

27. Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (карбиды). М.: Энергия. 1977. „

28. Mazony Y., Perkitts H. K.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. 13. P. 5130-5131.

29. Справочник по электротехническим материалам — 2-е ИЗД.ПОД ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Л.: Энергия. 1976.

30. Щелкотунов В. А., Данилов В. И., Калачева В. С.//ИЗВ. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1976. Т 12. № 6. С. 1076-1080.

31. **Физико-химические** свойства окислов: Справочник.—2-е изд./Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1978.

32. **Высокотемпературные** неорганические соединения. Киев: Наукова думка. 1965.

33. Масленников С. Б. Жаропрочные стали и сплавы: Справочник. М.. Металлургия. 1983.

34. Самсонов Г. В., Виницкий И. М. Тугоплавкие соединения: Справочник. -2-е изд. М.: Металлургия. 1976. л. -г^^ Mizutani T. e. a.//Jap. J. Appl. Phys. 1976. Vol. 15. № 7. P. 1305—1308.

36. Кузьминов Ю. С. Сегнетоэлектрические кристал-

37. Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы). Л.: Энергия. 1973.

Т 6 ^с''ТэТ" 796 "

39. Антонова М. М. Свойства гидридов металлов: Справочник. Киев: Наукова думка. 1975.

40. Cook W. R., Berlincourt D. A., Scholz F. J.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. № 5. P. 1392.

41 Материалы для ядерных реакторов: Пер. с англ./ Под ред. Ю. Н. Сокурского. М.: Госатомиздат. 1963.

42. Стекло: Справочник/Под ред. Н. М. Павлушкина. М.: Стройиздат. 1973.

43. Справочник оптика-технолога/Под ред. С. И. Кузнецова, М. А. Окатова. Л.: Машиностроение, 1983

44. Справочник конструктора оптико-механических приборов/Под ред. В. А. Панова. Л.: Машиностроение.

45. Свойства и разработка новых оптических стекол/ Под ред. Е. И. Царевского. Л.: Машиностроение. 1977.

46. Солнцев Ю. Н., Степанов Г. А. Материалы в криогенной технике. Справочник. Л.- Машиностроение,

47. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник.— 3-е изд. М.: Металлургия. 1974

48 Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. — 6-е изд. М.: Машиностроение, 1982. Т. 1—3.

49. Артефьев Ю. М.//Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1980. Вып. 15. С. 115—123.

50. Приданцев М. В., Давыдова Л. Н., Тамарина И. А. Конструкционные стали: Справочник. М.: Металлургия. 1980

51. Ульянин Е. А., Сорокина Н. А. Стали и сплавы в криогенной технике: Справочник. М.: Металлургия. 1984.

52. Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. М.: ОГИЗ, 1930. Т. 1.

53. Кацнельсон Н. Ю., Балаев Г. А. Пластические массы. Свойства и применения: Справочник. — 3-е изд. Л.: Химия 1978.

54. Калинчев Э. Л., Саковцева М. Б. Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. Л.: Химия.

55. Термопласты конструкционного назначения/Под ред. Е. Б. Тростянского. Л.: Химия. 1975.

56. Романенков И. Г. Физико-механические свойства пенистых пластмасс. М.: Изд-во стандартов. 1970.

57. Теплофизические свойства веществ при низких температурах. Материалы 1 Всесоюзного совещания, февр. 1971 М.: Изд. ВНИИФТРИ, 1972.

58. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 56—83. М.: Изд-во стандартов, 1984.

59. Таблицы стандартных справочных данных, ГСССД 3—77. М.: Изд-во стандартов, 1978.

60. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 59-83. М.: Изд-во стандартов. 1984.

61. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 45 83. М.: Изд-во стандартов, 1984.

62. Petukhov V. A., Chekhovskoi V. Ya., Andrianova V. G.//High Temp.—High Press. 1979. Vol. 11. № 6. P. 625—627.

ГЛАВА 11

ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ

В. в. Игнатьев, В. А. Криворучко, А. И. Мигачев

11.1 ПАРЫ воды

Таблица 11.1. Давление паров воды

t, °С	*р*. Па	*t*, "С	*Р*, Па	*t*.	*Р*. па	*t*. °С	*р*. Па
0	6,108-102	46	1,0085-10<	94	8,1460-104	142	3,8228-105
0,01	6,112-102	48	1,116110^	96	8,7685-104	144	4,0418-105
2	7,054-102	50	1,2335-10«	98	9,4301-104	146	4,2707-105
4	8,129-102	52	1,3612-10*	100	1,01325- 105	148	4,5099-105
6	9,346-102	54	1,5001-10«	102	1,0878-10»	150	4,7597-105
8	1,0721-103	56	1,6510-10^	104	1,1668-106	152	5,0205-105
10	1,2271-103	58	1,8146-104	106	1,2504-105	154	5,2926-105
12	1,4015-10=*	60	1,9919-10"	108	1,3390-105	156	5,5764-105
14	1,5974-103	62	2,1837-10^	ПО	1,4326-105	158	5,8722-105
16	1,8170-10^	64	2,3910-10«	112	1,5316-105	160	6,1804-105
18	2,0626-103	66	2,6148-10^	114	1,6361-105	162	6,5014-105
20	2,3368-103	68	2,8561-10'	116	1,7464-105	164	6,8355-105
22	2,6424-103	70	3,1161-10^	118	1,8628-lOi^	166	7,1830-105
24	2,9824-103	72	3,3957-104	120	1,9854-105	168	7,5445-105
26	3,3600-103	74	3,6963-10"	122	2,1145-105	170	7,9202-105
28	3,7785-103	76	4,0190-10'	124	2,2503-105	172	8,3106-105
30	4,2417-103	78	4,3650-104	126	2,3932-105	174	8,7161-105
32	4,7536-103	80	4,7359-104	128	2,5434-105	176	9,1370-105
34	5,3182-103	82	5,1328-104	130	2,7012-105	178	9,5739-105
36	5,9401-103	84	5,5572-104	132	2,8658-105	180	1,0027-10®
38	6,6240-103	86	6,0107-104	134	3,0406-105	182	1,0497-10®
40	7,3749-103	88	6,4947-104	136	3,2227-10'^	184	1,0984-10®
42	8,1983-103	90	7,0108-104	138	3,4137-105	186	1,1488-10в
44	9,0998-103	92	7,5607-104	140	3,6136-105	188	1,2011-108

продолжение табл. 12.3

t, 'C	р. Па	*t.* с	*Р.* па	*t.* ^с	р. Па	*t.* °с	*Р,* Па
190	1,2552-10«	238	3,2319-10«	284	6,8155-108	332	1,3199-10'
192	1,3112-108	240	3,3480-10«	286	7,0206-10®	334	1,3541-10'
194	1,3692-108	242	3,4674-10®	288	7,2303-10®	336	1,3889-10'
196	1,4291-10®	244	3,5899-108	290	7,4448-10®	338	1,4245-10'
198	1,4910-Ю"	246	3,7158-10®	292	7,6642-10®	340	1,4608-10'
200	1,5551-1№	248	3,8450-108	294	7,8885-10®	342	1,4978-10'
202	1,6212-10»	250	3,9/76-108	296	8,1178-108	344	1,5356-10'
204	1,6895-10"	252	4,1137-108	298	8,3521-10®	346	1,5742-10'
206	1,7601•10«	254	4,2533-108	300	8,5917-10®	348	1,6135-10'
208	1,8329-108	256	4,3965-108	302	8,8364-10®	350	1,6537-10'
210	1,9079-108	258	4,5434-108	304	9,0865-10®	352	1,6947-10'
212	1,9855-10®	260	4,6940-108	306	9,3420-10®	354	1,7365-10'
214	2,0654-W	262	4,8484-108	308	9,6031-10®	356	1,7792-10'
216	2,1478-108	264	5,0066-108	310	9,8697-10®	358	1,8228-10'
218	2,2327-108	266	5,1688-108	312	1,0142-10'	360	1,8674-10'
220	2,3201-108	268	5,3349-10"	314	1,0420-10'	362	1,9129-10'
222	2,4102-108	270	5,5051-10®	316	1,0704-10'	364	1,9594-10'
224	2,5030-10«	272	5,6794-10®	318	1,0994-10'	366	2,0069-10'
226	2,5985-10®	274	5,8579-108	320	1,1290-10'	368	2,0555-10'
228	2,6968-108	276	6,0406-10®	322	1,1592-10'	370	2.1053-10'
230	2,7979-108	278	6,2277-108	324	1,1900-10'	372	2,1562-10'
232	2,9019-10«	280	6,4191-108	326	1,2215-10'	374	2,2084-10'
234	3,0089-108	282	6,6150-10®	328	1,2537-10'	374,12	2,2115-10'
236	3,1189-108			330	1,2865-10'		

11.2. ПАРЫ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Данные, приведенные в табл. 11.2—11.4, получены путем пересчета значений, выраженных в миллиметрах ртутного столба, в паскали. Пересчет производился иа ЭВМ методом наименьших квадратов исходя из известного соотношения между давлением насыщенного пара и температурой ***p=B—A/T.***

Давление пара нептуния получено расчетным путем из выражения

$$\lg p = 5,1 - 2.(\cdot 10^{4}(1/Г),$$

приведенного в [2].

Таблица 11.2. Температура насыщения неорганических веществ, К; /> = W « ч-10^ Па [3]

Вещество	Давление пара. Па										
	1(Г»	10-'	10-"	Ю-'і	10-	10-»	10-«	10-»	^ 1	10	юг
Азот			23,4	25,0	26,7	28,7	31,0	33,8	37,1	41,1	46,0
А	816,7	861,8	912,2	968,8	1033	1106	1190	1289	• 1405	1544	1713
Алюминия трехфтористый								966,2	1024	1090	1165
Длюминий фтористый							812,2		1004	1138	
А р i [4, 5]							1066	' 1164'	1283	1427	1609
і трехфтористыи				1083	1149	1225	1310	1409	1524		

Вещество	10"»	10-'	10-«	10-5	10-	10-=	Ю-ii	10->	1	10	102
Аммиак			89,9	95,2	101,1	107,8	115,4	124,2	134,4	146,5	160,9
Аргон			26,5	28,3	30,3	32,7	35,5	38,7	42,6	47,4	53,5
Барий	492,6	521,6	554,1	591,0	633,1	681,7	738,4	805,3	885,6	983,7	1106
Барий фтористый [6]	–	–	–	—	1116	1187	1268	1361	1469	–	–
Бария оксид [7]	–	–	1153	1226	1309	1404	1514	–	—	–	–
Бериллий	864,4	911,4	963,8	1022	1089	1164	1251	1353	1471	1613	1785
Бериллий фтористый		–	–	–	681,1	721,4	766,8	818,3	877,2	945,2	1024
Бериллий хлористый [101			–	–	–	–	439,5	468,0	500,6	537,9	581,4
Бор	1456	1531	1614	1706	1810	1926	2059	2212	2389	2597	2845
Бора оксид [3, 11]	–	—	–	•–	–	—	1234	1331	1445	1581	1744
Бром			127,4	134,5	142.5	151.4	161,6	173,2	186,6	202,2	220,7
Ванадий	1282	I34S	1421	1502	1594	1697	1814	1949	2105	2289	2508
Висмут	460,7	485,3	512,7	543,4	578,0	617,3	662,4	714,5	775,5	848,0	935,3
Висмут треххлористый [12]	–	–	–	–	327,1	345,4	365,8	388,8	414,8	444,6	479,1
Вода	–	–	143,5	151,8	161,0	171,4	183,2	196,8	212,6	231,2	253,3
Водород			3,7	4,0	4,3		5,3	5,9	6,8	7,9	9,4
Водород бромистый	–	–	67,1	71,4	76,4	82,1	88,7	96,4	105,6	116,8	130,7
Водород фтористый										172,5	178,2
Водород хлористый	–	–	63,5	67,4	71,8	76,9	82,7	89,4	97,3	106,8	118,3
Вольфрам	2141	2249	2367	2500	2647	2814	3002	3218	3467	3759	4103
Вольфрама трехокись [13]						–	1252	1323	1401	1490	1590
Гадолиний	–	–	—	—	1338	1437	1550	1683	1842	2033	2268
Галлий >	744,2	786,2	833,3	886,4	946,6	1015	1095	1189	1300	1434	1599
Галлий трехиодистый [14]		–	—	–	—	302,8	322,6	345,2	371,2	401,5	437,1
Галлия оксид [151	–	–	–	—	–	–	–	1646	1752	1873	2012
Гафний	1675	1765	1865	1978	2104	2248	2414	2605	2829	3096	3418
Гелий					–	–		0,6	0,8	0,9	1,2
Германий	972,4	1025	1085	п й	1228	1314	1414	1530	1666	1830	2028
Германий селенистый [16]	–	–	–	–	—	–	–	677,8	730,4	792,0	864,8
Германий сернистый 11J	–	–	–	–	–	–	572,1	609,6	652,3	701,5	758,7
Германий теллуристый 11U, IQJ						620,7	661,1	707,1	760,0	821,4	893,6
Гольмий	810,0	870,0	915,0	985,0	1040,0	1160,0	1225,0	1350,0	1480,0	1556,0	1720,0
Диспрозий [19]					1009	1082	1165	1263	1378	1517	1686
Европий	500,0	528,1	559,7	595,5	635,6	681,9	735,4	798,1	872,4	961,9	1072
Железо	1010	1063	1123	1189	1263	1347	1443	1554	1684	1837	2021
Железо бромистое [20, 21]	–	–				596,4	633,6	675,8	724,1	779,7	844,6
Железо иодистое [21]							614,3	653,3	697,6	748,3	807,0
Железо хлористое [21]	–	–	–	–	–	–	645,8	692,1	745,4	807,7	881,4
Золото	964,3	1017	1076	1143	1219	1305	1404	1520	1656	1819	2018
Индий	658,0	696,2	739,0	787,4	842,6	906,1	980,0	1067	1170	1297	1454
Индий трехбромистый 14]	—	–	–	–	–	400.5	424,0	450,4	480,3	514,5	553,9
Индий трехиодистый 14]	—	–	—	–	–	350,7	372,3	396,7	424,6	456,7	494,1
Индий треххлористый 14]	–	–	—	—	–	455,2	482,3	512,8	547,5	587,1	633,0
Индия оксид [22]							1504	1590	1686	1795	1919
Иод	160,0	168,0	176,9	186,9	198,0	210,5	224,6	240,9	259,6	281,6	307,5
Иридий	1556	1636	1724	1822	1932	2057	2198	2360	2548	2768	3030
Иттербий [19]	–				533,7	573,5	619,8	674,1	738,9	817,4	914,6
Иттрий [14, 23]	–	–			1375	1474	1590	1725	1885	2078	2314
Иттрий треххлористый								751,3	821,4	906,0	J010
Кадмий	307,5	324,6	343,9	365,5	390,0	418,1	450,5	488,3	533,1	586,9	652,8
Кадмий бромистый [25]	—	–	—	–	—	–	486,0	528,6	579,5	641,1	717,5
Кадмий мышьяковистый	—	–	—	–	–	510,3	543,7	581,7	625,5	676,3	
Кадмии селенистый	—	–	—	–	—	–	791,1	852,6	924,5	1009	
Кадмий теллуристый							712,5	770,2	**838,0**	919,0	
Кадмий хлористый					534,9	567,9	605,2	647,8	**696,8**	753,8	821,0
Калий	259,9	275,6	293,3	313,4	336,5	363,3	394,7	432,1	477,3	533,0	603,4
Калий фтористый [26]	–	–	–		738,7	785,9	839,6	901,2	972,5	1056	1155
Калий хлористый	–	–	–			723,7	774,7	833,3	901,7	982,2	1078
Кальций	486,2	514,0	545,2	580,5	620,6	666,7	720,2	783,0	857,8	948,4	1060

	Давление пара, Па										
		10-'	ш-б	10-5	10-«	10-2		10->	1	10	102
Кальций фтористый [27, 28]	-	-	-	1125	1193	1269	1356	1455	1571	1706	1866
Калции хлористый [29, 30]	-	-	-	874,8	926,4	984,5	1050	1125	1212	1314	1434
Кислород			27,8	29,6	31,6	33,8	36,4	39,5	43,1	47,4	52,7
Кобальт	877,4	922,4	972,3	1027	1090	1160	1240	1332	1439	1564	1713
Кремний	961,8	1011	1066	1128	1197	1275	1365	1467	1586	1727	1894
						1472	1615	1789			
			36,5	38,9	41,7	45,0	48,8	53,3		65,3	
			50,3	53.7	57,6	62,1	67.3	73,5	81,0	90,1	101,6
	1152	1216	1288	1368	1459	1564	1684	1825	1991	2190	2433
Лантан			–	803,0	847,4	897,1	953,0	1016	1088	1172	
Лантан треххлористый	447,7	473,8	503,2	536,4	574,4	618,1	669,0	729,1	801,0	888,7	997,9
Литий [31]			–	–	829,6	880,1	937,2	1002	1077	1163	1265
Литий фтористый			–	–	–	–	–	778,0	849,0	934,3	1038
Литий хлористый [31]			–	–	1412	1510	1623	1755	1909	2094	2318
Лютеций [191	404,1	426,8	452,1	480,6	513,0	550,0	592,8	642,8	702,0	773,3	860,6
Магний [6, 31]			–	–	–	1170	1245	1329	1425	1537	1667
Магний фтористый [31]	–	–	–	–	–	–	790,1	842,1	901,5	969,8	1049
Магний хлористый	731,5	770,8	814,6	863,6	918,8	981,7	1053	1137	1235	1351	1491
Марганец	889,1	937,8	992,1	1053	1122	1200	1291	1396	1520	1668	1849
Медь			31,7	33,9	36,5	39,4	42,9	47,1	52,1	58,3	66,3
Метан	1664	17Ы	1848	1955	2076	2213	2370	2550	2759	3007	
Молибден							798,8	837,3	879,6	926,4	978,5
Молибдена триоксид [13]	339,5	356,1	374,5	3Й,8	417,5	442,9	471,6	504,3	541,9	585,6	636,8
Мышьяк	306,0	324,2	344,7	367,9	394,5	425,2	461,2	503,7	554,9	617,7	696,5
Натрий							740,8	802,1	874,5	961,2	1067
Натрий бромистый [25]					847,9	901,0	961,2	1030	1109	1202	1312
Натрий фтористый [26]	899,3	951,2	1009	1076	1150	1236	1336	1454	1595	1766	1978
Неодим [19]			7,3	7,8	8,4	9,1	9,9	10,9	12,1	13,6	15,5
Неон					1548	1685	1849	2048	–	–	–
Нептуний [32]	848,5	892,0	940,1	993,7	1053	1121	1198	1287	1389	1510	1653
Никель							949,3	1023	1109	1212	1335
Никель фтористый [33]	1802	1895	1997	2110	2238	2382	2545	2733	2951	3206	3510
Ниобий	850,0	898,9	953,7	1015	1086	1167	1261	1372	1504	1664	1862
Олово	–	–	–	–	–	–	725,5	783,2	850,9	931,3	1028
Олово селенистое [34, 35]											
Олово теллуристое [34 , 35]							757,5	815,1	882,1	961,2	1055
	1792	1882	1982	2094	2218	2359	2518	2700	2911	3158	3450
Осмий	991,8	1048	1111	1182	1262	1355	1462	1588	1738	1918	2140
Палладий [36, 37]	1404	1478	1560	1650	1752	1867	1999	2150	2326	2534	2782
Платана [3, 36]						1351	1463	1596	1755	1949	–
Плутоний [38]											
Плутоний трехфтористый [6]						1192	1269	1357	1458		
	351,6	371,3	393,3	418,0	446,1	478,2	515,3	558,6	609,9	671,5	747,0
Полоний					1274	1371	1483	1616	1774	1967	2208
Празеодим [19]	457,8	484,7	515,0	549,3	588,5	633,7	686,5	748,8	823,6	915,0	1029
Радий	1966	2070	2186	2317	2463	2630	2820	3041	3299	3604	3972
Рений	1383	1455	1535	1624	1724	1837	1966	2114	2287	2491	2734
Родий	181,9	192,1	203,5	216,3	230,9	247,5	266,7	289,2	315,8	347,8	387,0
Ртуть						275,7	294,4	315,8	340,5	369,3	403,6
Ртуть хлористая [39]	237,0	251,4	267,6	286,2	307,5	332,2	361,2	395,7	437,6	489,4	555,1
Рубидий					693,9	738,2	788.6	846,3	913,1	991,4	1084
Рубидий фтористый [26]								799,2	867,0	947,5	1044
Рубидий хлористый	1646	1729	1820	1922	2036	2165	2311	2478	2670	2896	3163
Рутений	573,9	605,7	641,3	681,4	726,8	778,7	838,5	908,4	990,9	1089	1210
Самарий											
								751,7	814,9	889,7	979,7
Самарии треххлористый	**546,3**	578,4	614,6	655,6	702,4	756,5	819,5	894,1	983,6	1092	1229
						725,6	776,5	835,0	903,0	983,2	1078
Свинец						729,7	778,5	834,3	898,6	973,7	1062
Свинец селенистый [40]							729,6	793,1	868,7	960,2	1073
Свинец теллуристый [41]							885,0	945,2	1014	1094	1187
Свинец фтористый											
Свинца оксид											

Давление пара. Па

			10-«	10-"	10-*	10-®				
Селей		335,6	352,8		393,0	416,8	443,6	474.1	509.1	549,7
Сера	232,2	244,0	257,0		2-87,6	305,8	326,5	350.2	377.6	409,7
Серебро	752,5	793,8	840,0		950,4	1017	1094	1183	1289	1415
Серебро бромистое	25]						1076	1149	1233	1329
Серебро теллуристое [42]							1013	1073	1140	1216
Сероводород			72,8	77,3	82,4	**88,2**	94,9	102,7	111,9	122,9
Скандий [19, 23, 43—45]	951,4	1004	1064	ИЗО	1206	1293	1393	1511	1649	1816
Стронций	453,3	479,2	508,2	540,9	578.2	620,9	670,5	728,7	797,9	881,6
Стронций фтористый [6]				1160	1225	1298	1381	1474	1581	
Сурьма	486,0	511,8	540,4	572,3	608,4	649,2	695,9	749,9	812,9	887,5
Таллий	490,4	518,8	550,7	586,7	627,7	674,9	729,9	794,5	871.7	965,5
Таллий селенистый [46]					459.3		523,8	563.3	609,3	
Таллий сернистый [47]							390.8	428.1	473.2	529,0
Тантал	2003	2106	2221	2348	2492	2653	2838	3050	3296	3585
Теллур	399,5	419,5	441,7	466,3	493,9	524,9	560,0	600,3	646.7	700,9
Теллура диоксид [48]					716.4	757,6	803.9	856.2	915.8	984,3
Тербий [19]					1295	1389	1498	1625	1776	1958
Титан			1333	1409	1495	1591	1701	1828	1975	2147
Титан сернистый Д49]						1692	1811	1948	2108	2296
Торий			1693	1799	1919	2056				
Торий четырехфтористый							1047	1116	1195	
Тулий	655,0	1855	729,6	773,6	823,3		944,6	1019	1107	1212
Углерод (графит) [51]			1953	2063	2185	2323	2480	2659	2867	3109
Углерода диоксид			75,6	**80,0**	85,0	90,7	97,1	104,6	113,3	123,6
Углерода оксид		1323	26,4	**28.1**	30.0	32,2	34,7	37,6	41,0	45,2
Уран			1401	1490	1591	1706	1839		2180	2402
Урана диоксид			1581		1768		2005			
Уран четырехфтористый									1070	1148
Уран черыреххлористый [52]							597,1		676,5	723,0
Фосфор белый	156.8	166,0	176,2	187,8	201,1	216,3	234.1	255,0	**280,0**	310.5
Фосфор красный	296.9	310,3	325,0	341,2	359,0	378.8	400,9	425,7	453.8	485,9
Фос(}х)р красный	203.7	216,3	230,5	246,7	265,3	286.9	312.5	343,0	380,1	426.2
Франций										42,4
Фтор					94,3	100,7	108,1	116,6	126,5	138.3
Хлор		1030			1220	1301	1392	1498	1621	1765
Хром							1716	1840	1985	2154
Хрома оксид							792.6	850,2	916.9	994,9
Хром бромистый [53]							826.2	871.0	920,9	976,9
Хром иодистый [54]	225,'		254,7	272,4	292,8	316,5	344.3	377,5	417,8	467.6
Цезий								747.4	«06,2	874,9
Цезий бромистый [55]						644.0	687,6	737.5	795,1	**862,6**
Цезий иодистый [55]					610,7	649,9	694.4	745.6		874,3
Цезий фтористый [26, 55]				581,0	617.3	658.3	705.2	759,2	822,3	896,3
Цезий хлористый [55, 56]					1306	1391	1487	1598	1727	1879
Церий		374, (	396,6	421,3	449.4	481.4	518.3	561.4	612.3	673,3
Цинк					394,9	421,9	452,9	488.7	530,7	580,6
Цинк бромистый [25]					517,9	555.1	598,2	648.5		
Цинк мышьяковистый [59]							911,6	974.1	1045	1128
Цинк срленистый									1127	1252
Цинк сернистый							778,2	839,6	911.4	
Цинк теллуристый	1565				1963	2096	2249	2426	2633	2878
Цирконий					1128	1207		1403	1527	1674
Эрбий [19]										

Таблица 11.3. Температура насыщения неорганических веществ. К; р = 0,1-^-100 кПа [3]

В таблице приведены значения температуры. К, при которых устанавливается указанное давление га

	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Азот	46,0	47,9	50,7	53,0	55,5	59,3	62,5	66,1	71,5	76,2
Азота закись	127,9	132,0	137,7	142,4	147,4	154,6	160,5	166,9	176,1	183,9
Азота оксид	85,6	88,2	91,7	94,6	97,7	102,1	105,7	109,6	115,2	119,8
Азота фтороксид	127,0	131,9	138,8	144,6	150,8	160,0	167,7	176,2	188,9	199,7
Азота тетраоксид	213,1	218,9	227,0	233,5	240,4	240,2	258,1	266,6	278,7	288,6
Азотный ангидрид	234,0	239,6	247,5	253,8	260,5	269,8	277,3	285,3	296,5	305,6
Азот трехфтористый [3, 60]	87,3	90,8	96,0	100,4	105,2	112,2	118,2	124,8	134,8	143,6
Алюминий	1719	1780	1868	1941	2019	2133	2228	2332	2486	2616
Алюминий-боргидрид	–	205,4	216,7	226,1	236,4	251,5	264,2	278,3	299,5	317,8
Алюминий бромистый	343,3	355,5	372,9	387,3	402,8	425,3	444,1	464,6	494,9	520,5
Алюминий иодистый	439,7	454,5	475,7	493,0	511,7	538,7	561,1	585,4	621,0	650,9
Алюминий однофтористый [61]	1253	1266	1283	1297	1310	1329	1343	1357	–	
Алюминий фтористый	1496	1521	1557	1585	1614	1654	1685	1718	1763	1799
Алюминий хлористый	369,8	376,8	386,4	394,0	401,9	412,9	421,6	430,6	443,3	453,3
Алюминия оксид	2394	2459	2551	2624	2702	2813	2903	2998	3135	3247
Америций [4]	1649	1718	1820							
Аммиак	159,7	165,1	172,7	178,9	185,7	195,4	203,4	212,2	224,9	235,7
Аммоний бромистый	465,2	479,9	500,8	517,9	536,1	562,3	583,9	607,2	641,1	669,3
Аммоний иодистый	473,4	488,4	509,8	527,2	545,9	572,8	594,9	618,8	653,6	682,5
Аммоний кислый сернис-тый	218,8	225,2	234,2	241,6	249,4	260,5	269,7	279,4	293,5	305,1
Аммоний хлористый	428,4	441,8	460,7	476,1	492,6	516,2	535,7	556,6	587,0	612,3
Аммоний цианистый	219,4	225,6	234,5	241,7	249,4	260,3	269,1	278,7	292,3	303,6
Аммония азид	299,3	307,4	318,9	328,2	338,1	352,0	363,4	375,5	392,8	407,0
Аммония карбамат	243,9	250,5	259,8	267,4	275,4	286,7	295,9	805,7	319,7	331,2
Аргон	53,2	55,3	58,4	61,1	63,9	68,1	71,7	75,7	81,7	86,9
Аргон [62j	143,3	150,4	160,9	169,9	180,0	195,3	208,7	224,1	248,2	270,3
Астат	427,7	441,0	459,7	475,0	491,4	614,8	534,1	554,9	584,9	609,9
Барий	1113	1161	1232	1291	1357	1455	1538	1632	1775	1902
Барий хлористый [63]	1533	1590	1672	1740	–	–				
Бериллий	1793	1857	1949	2025	2108	2228	2328	2438	25М	2737
Бериллий-боргидрид	272,3	279,4	289,4	297,4	305,8	317,8	327,4	337,7	352,7	364,3
Бериллий бромистый	556,5	571,0	591,5	608,1	625,5	650,2	670,2	691,5	721,8	746,5
Бериллий иодистый	550,3	566,0	588,2	606,1	625,2	652,3	674,5	698,2	732,2	760,3
Бериллий фтористый	1022	1052	1094	1128	1164	1216	1258			
Бериллий хлористый	557,6	572,8	594,1	611,4	629,7	655,6	676,7	699,1	731,3	757,6
Бор	2859	2950	3079	3185	3299	3461	3596	3741	3952	4128
Бор трехиодистый [64]	301,4	313,1	329,9	343,9	359,1	381,4	400,2	421,0	452,0	478,6
Бор трехфтористый	116,3	120,2	125,7	130,3	135,2	142,2	148,0	154,3	163,6	171,4
Бор треххлористый	177,8	184,7	194,7	203,0	212,0	225,3	236,5	248,9	267,4	283,3
Бром	216,5	224,1	234,9	243,8	253,4	267,4	279,0	291,7	310,3	326,1
Бромдихлорфторсилан	182,2	189,9	201,1	210,5	220,8	236,1	249,1	263,7	285,8	305,2
Бром пятифтористый [65]	197,8	205,4	216,4	225,5	235,4	250,0	262,2	275,7	295,8	313,1
Бромсилан		173,8	183,7	192,1	201,2	214,7	226,1	238,8	258,1	274,8
Ванадий	2519	2600	2716	2810	2912	3057	3177	3308	3497	3655
Ванадия окситрифторид [66]							336,4	349,6	368,7	384,6
Ванадия оксигрихлорид [3,67]	244,7	254,6	268,9	280,8	293,9	313,2	329,5	347,6	374,9	
Висмут	1030	1072	1134	1185	1241	1324	1395	1473	1592	1695
Висмут пятифтористый	343,4	354,7	370,8	383,9	398,1	418,5	435,4	453,7	480,4	502,7
Висмут трехбромистый	—	501,3	525,6	545,6	567,2	598,5	624,5	653,0		730,2
Висмут трехиодистый	519,6	539,2	567,4	590,8	616,3	653,5	684,7	719,1	770 !з	814,1
Висмут хрехлористый	–	484,4	508,3	528,0	549,4	580,3	606,2	634,5	676,2	711,5
Вода	250,8	259,2	271,2	281,1	291,7	307,1	319,8	333,7	353,9	370,9
Вода (дейтериевая)	–	–	271,7	281,8	292,7	308,4	321,5	335,7	356,5	374,1
Вода (дейтероводородная)	–	–	270,8	280,8	291,7	307,4	320,4	334,6	355,4	373,0
Вода (тяжелокислород-ная)	_	_	269,7	279,8	290,7	306,4	319,5	333,8	354,7	372,4
	9,3	9,9	10,7	11,4	12,2	13,4	14,6	15,9	18,1	20,2

Вещество	Давление пара, кПа									
	1	0.2	0.5	Г	2	5	10	20	50	100
Водород (дейтерий)	11,9	12,5	13,4	14,2	15,1	16,5	17,7	19,1	21,3	23,4
Водород (дейтероводород)	10,7	11,3	12,2	12,9	13,8	15,1	16,3	17,6	19,9	22,0
Водород (тритий)	13,3	14,0	15,0	15,8	16,8	18,3	19,6	21,1	23,5	25,7
Водорода перекись	282,9	292,8	307,1	318,9	331,6	350,1	365,5	382,3	407,1	428,0
Водород бромистый	131,4	136,3	143,4	149,2	155,6	164,8	172,6	181,1	193,8	204,6
Водород двухсернистый	226,5	234,2	245,2	254,3	264,0	278,1	289,8	302,6	321,2	336,9
Водород иодистый	146,7	152,6	161,0	168,1	175,8	187,2	196,8	207,4	223,4	237,2
Водород мышьяковистый	127,2	132,4	139,9	146,2	153,1	163,3	171,9	181,5	196,0	208,6
Водород селенистый	154,0	159,2	166,6	172,7	179,2	188,6	196,5	205,0	217,4	227,9
Водород теллуристый	171,9	178,2	187.4	194,9	203,1	215,1	225,1	236,1	252,5	266,4
Водород фтористый	175,4	182,7	193,4	202,3	212,2	226,7	239,1	252,9	273,9	292,2
Водород хлористый	119,3	123,8	130,2	135,5	141,3	149,7	156,8	164,5	176,1	185,9
Вольфрам	4098	4214	4377	4510	4650	4850	5013	5188	5438	5643
Вольфрам окситетрахлорид [68]	374,2	383,6	396,7	407,2	418,3	434,0	446,6	460.0	478.9	494,4
Вольфрам пятибромистый [69]	436,2	451,4	473,2	491,2	510,5	538,6	562,0	587,5	624,9	656,6
Вольфрам пятихлористыи [70]	-	406,0	423,0	436,9	451,6	472,8	490,1	508,8	535,7	558,1
Вольфрам шестифтористый	198,2	204,5	213,5	220,9	228,8	240,1	249,4	259,5	274,2	286,5
Вольфрам шестихлористый [68]	414,6	428,1	447,5	463,4	480,4	504,9	525,2	547,2	579,2	606,0
Гадолинии	2280	2420	2634	2823	3041	3386	3704	4088	4738	5385
Галлий	1596	1656	1743	1815	1894	2009	2105	2211	2369	2504
Галлий треххлористый	309,8	320,6	336,1	348,8	362,6	382,5	399,1	417,3	443,9	466,4
Гафний	3370	3518	3734	3916	4117	4416	4673	4961	5403	5792
Гафний четыреххлористый *13,* 71, 72]	441,0	452,5	468,6	481,6	495,4	514,7	530,5	547,1	570,9	590,3
Гексаборан [73]	234,9	243,3	255,2	265,1	275,8	291,3	304,2	318,4	339,2	356,9
Гексафторидсилан	190,2	195,1	202,1	207,6	213,5	221,9	228,6	235,8	246,0	254,3
Гексахлоридсилан	272,9	282,4	296,1	307,4	319,6	337,3	352,0	368,0	391,7	411,7
Гексахлордисилоксан	267,0	276,3	289,6	300,6	312,4	329,6	343,9	359,4	382,3	401,7
Гелий	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,1	2,4	2,8	3,6	4,6
Германий	2044	2117	2222	2309	2403	2540	2654	2778	2963	3119
Германий бромистый	–	293,2	309,7	323,4	338,5	360,6	379,4	400,2	431,6	458,8
Германий хлористый	222,9	231,5	243,9	254,2	265,4	281,8	295,6	310,8	333,6	353,2
Германия гидрид	108,2	112,8	119,6	125,4	131,7	141,0	149,1	158,0	171,7	183,8
Гидроксиламин	–	298,8	308,8	316,8	325,2	337,1	346,6	356,8	371,1	382,7
Дейтероаммиак	–	–	–	–	–	192,9	201,9	211,9	226,7	239,3
Дейтеродиборан [74]	109,0	113,5	119,9	125,3	131,1	139,8	147,1	155,3	167,6	178,3
Диборан [3, 74, 75, 76]	109,2	113,7	120,3	125,7	131,7	140,5	148,1	156,4	169,0	180,0
Дибромдифторсилан	–	–	193,4	201,9„	211,2	224,9	236,6	249,5	268,8	**285,6**
Дибромсилан	208,1	216,6	229,0	239,3	250,7	267,4	281,6	297,4	321,2	**342,0**
Дибромхлорфторсилан	203,6	211,8	223,7	233,7	244,5	260,6	274,2	289,2	312,0	331,6
Дигерман	180,8	188,5	199,6	208,9	219,2	234,4	247,4	261,9	283,9	303,2
Дигидродекаборан	324,1	334,4	349,0	360,9	373,7	392,1	407,2	423,5	–	–
Дигидропентаборан	–	217,1	228,7	238,3	248,7	264,1	277,0	291,2	312,5	330,7
Дииодсилан	–	256,4	272,4	285,8	300,7	323,0	342,2	363,7	396,8	426,1
Дисилазан	200,4	208,2	219,5	228,9	239,2	254,2	266,9	280,9	301,9	319,9
Дисилан	154,9	161,4	170,8	178,6	187,3	200,1	211,0	223,1	241,5	257,6
Дисилоксан	158,1	164,5	173,7	181,4	189,9	202,3	212,8	224,4	242,0	257,2
Диспрозий [77]	1750	1810	2000	2060	2140	2300	2430	2590	2720	2880
Дифторсилан	123,6	128,3	135,0	140,6	146,7	155,6	163,0	171,3	183,5	193,9
Дихлордифторсилан	145,3	151,3	160,2	167,5	175,6	187,6	197,8	209,2	226,4	241,5
Европий	1074	1116	1178	1230	1286	1369	1440	1517	1634	1735
Европий хлористый [78]	1549	1608	1694	1765	1843	1957	2052	2158	2316	2451
Железа карбонил	–	248,8	262,0	273,0	284,9	302,4	317,0	333,2	357,4	378,1
Железо	2031	2101	2201	2283	2371	2499	2605	2721	2891	3034
Железо бромистое [79]	825,2	853,0	892,8	925,5	960,6	1011	1053	1099	1166	1222
Железо хлористое			917,1	953,3	992,5	1049	1097	1149	1226	1292
Железо хлорное	465,5	475,5	489,4	500,5	512,1	528,3	541,2	554,7	573,7	589,0
Золото	2025	2099	2204	2291	2385	2522	2636	2762	2947	3105
Индий	1452	1508	1589	1656	1730	1837	1928	2029	2178	2307

	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	П,5	1	2	5	10	20	50	100
Индий хлористый [80]	602,4	623,6	654,1	679,3	706,4					
Индия сульфид [81]	1265	1303	1358	1402	1449	1517	1572	1631		—
Иод	304,7	314,8	329,3	341,1	353,9	372,3	387,5	404,0	428,1	448,4
Иод пятифтористый	245,«	254,5	267,0	277,3	288,5	304,6	318,1	332,9	354,7	373,1
Иодсилан	–	204,4	215.8	225.2	235,5	250,7	263,5	277,7	299,0	317,4
Иридий	3033	3133	3274	3390	3514	3693	3841	4001	4235	4431
Иттербий	912,7	945,9	993,8	1033	1076	1138	1190	1248	1332	1405
Иттербий хлористый [78]	1510	1571	1659	1733	1814	1932	2033	2145	2313	2459
Итрий	2362	2443	2560	2657	2760	2910	3035	3172	3371	3540
Кадмий	655,9	681,0	717,3	747,4	780,2	828,2	868,6	913,1	979,6	1036
Кадмий бромистый [82]	727,9	756,9	799,0	834,0	872,2	928,5				
Кадмий иодистый	678,1	703,8	741,0	771,8	805,3	854,4	895,6	941,0	1008	1066
Кадмий фтористый	1636	1683	1750	1805	1863	1945	2012	2084	2188	2274
Кадмий хлористый [3, 83]	804,9	834,0	875,9	910,6	948,0	1002	1048	1098	1172	1234
Кадмия диметил [84, 85]	242,9	251,8	264,6	275,2	286,6	303,3	317,2	332,5	355,2	374,5
Кадмия оксид	1255	1295	1354	1401	1452	1526	1587	1653	1749	1829
Калий	606,6	633,1	672,0	704,7	740,8	794,5	840,7	892,5	971,7	1041
Калий бром1Ктый	1046	1086	1143	1191	1243	1319	1383	1454	1559	1649
Калий едкий	972,1	1011	1068	1116	1168	1246	1311	1384	1493	1589
Калий иодистый	999,5	1038	1094	1140	1190	1265	1327	1396	1499	1588
Калий фтористый	1138	1180	1241	1291	1345	1425	1491	1564	1673	1766
Калил хлористый	1075	1115	1172	1220	1272	1348	1411	1481	1584	1673
Кальций	1060	1104	1168	1221	1280	1366	1440	1522	1646	1754
Кальций хлористый [63]	1467	1516	1586	1643						
Карбоинлборин	131,2	136,3	143,6	149,7	156,4	166,1	174,3	183,3	196,8	208,5
Карбоинплхлорид (фосген)	176,3	183,1	192,8	200,9	209,8	222,7	233,5	245,5	263,4	278,8
Кислород	53,0	55,3	58,6	61,3	64,4	68,9	72,8	77,1	83,7	89,5
Кобальт	1717	1774	1855	1921	1992	2095	2180	2272	2406	2519
Кобальаа нитрозилтрикарбонил	–	–		255,7	266,7	282,8	296,4	311,3	333,4	352,4
Кобальт хлористый	—	—	—	—	974,4	1038	1091	1151	1241	1319
Кремний	1908	1975	2071	2151	2236	2361	2465	2578	2745	2886
Кремний четырехиодистый [64]	357,4	371,3	391,4	408,2	426,4	453,1	475,7	500,6	537,9	570,0
Кремний четырехфтористый	127,5	131,2	136,6	140,9	145,5	152,1	157,4	163,2	171,5	178,4
Кремний четыреххлористый	205,6	213,6	225,2	234,8	245,2	260,6	273,5	287,8	309,2	327,6
Кремния оксид	–		1918	1979	2043	2134	2209	2289	2404	2500
Криптон	73,6	76,6	80,8	84,4	88,3	94,1	98,9	104,3	112,5	119,5
Ксенон	103,3	107,3	113,1	118,0	123,3	131,0	137,6	144,8	155,6	165,0
Лантан	2428	2516	2642	2746	2858	3022	3158	3308	3529	3717
Литий	999,4	1038	1095	1142	1193	1269	1332	1403	1508	1599
Литий бромистый	1003	1041	1096	1141	1190	1263	1323	1390	1490	1575
Литий иодистый	981,3	1013	1060	1098	1138	1197	1246	1298	1375	1440
Литий фтористый	1299	1344	1408	1461	1518	1601	1669	1744	1854	1947
Литий хлористый	1038	1077	1135	1183	1235	1312	1377	1448	1554	1645
Лютеций	2258	2371	2538	2681	2841	3085	3298	3544	3931	4285
Магний	858,4	891.8	940,2	980,3	1024	1088	1142	1202	1292	1369
Магний хлористый	1030	1071	1131	1182	1237	1318	1387	1463	1578	1678
Марганец	1494	1551	1635	1704	1780	1891	1984	2087	2241	2373
Марганец хлористый		936,3		1031	1079	1148	1208	1273	1371	1456
Медь	1850	1929	2044'	2141	2247	2404	2539	2689	2918	3118
Медь бромистая	814,8	856,3	918,0	971,0	1030	1121	1201	1293	1439	1574
Медь иодистая	–	786,5	849,2	903,6	965,5	1061	1148	1249	1415	1573
Медь хлористая	783,7	827,7	894,1	951,8	1017	1119	1211	1320	1497	1666
Молибден	3326	3444	3614	3755	3906	4126	4310	4511	4807	5058
Молибдена диоксихлорид [86]	332,1	340,1	351,3	360,3	369,8	383,0	393,8	405,1	421,1	434,0
Молибдена окситетрахлорид [68]	328,3	341,4	360,3	376,0	393,2	418,5	439,8	463,5	499,1	529,8
Молибдена триоксид	971,0	1001	1045	1080	1118	1173	1218	1267	1337	1396
Молибден пятихлористый	355,4	368,4	387,1	402,5	419,2	443,6	464,0	486,4	519,5	547,7

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0.5	1	2	5	10	20	50	100
Молибден шестифторис-	203,7	210,7	220,7	229,0	237,8	250,7	261,4	273,0	290,1	304,5
Монобромдиборан	176,8	184,0	194,4	203,1	212,7	226,7	238,6	251,9	271,8	289,1
Моногерман [87]	109,4	114,0	120,8	126,5	132,8	142,0	150,0	158,8	172,3	184,1
Мышьяк	635,4	653,8	679,8	700,8	723,3	755,2	781,3	809,3	849,5	882,6
Мышьяка триоксид	466,4	483,0	506,9	526,5	547,7	578,6	664,3	632,4	673,9	709,1
Мышьяк пятифтористый	151,1	155,8	162,4	167,8	173,6	181,9	188,7	196,0	206,6	215,4
Мышьяк трехбромистый	309,0	320,9	338,2	352,5	368,1	391,0	410,3	431,6	463,4	490,7
Мышьяк трехиодистый [88]	405,2	420,5	442,7	461,2	481,2	510,5	535,1	562,2	602,7	637,3
Мышьяк трехсернистый [89]	533,8	556,9	590,8	619,2	650,6	697,3	737,3	782,2	850,7	911,0
Мышьяк трехфтористый			—	—	255,3	269,5	281,3	294,2	313,1	329,1
Мышьяк треххлористый	256,7	266,4	280,3	291,8	304,3	322,6	337,9	354,8	379,9	401,4
Натрий	697,8	726,9	769,2	804,6	843,5	901,0	950,0	1004	1087	1159
Натрий бромистый	1060	1100	1157	1205	1256	1331	1395	1464	1567	1656
Натрий иодистый	1022	1059	1113	1157	1205	1274	1332	1396	1490	1570
Натрий фтористый	1329	1374	1439	1491	1548	1630	1698	1772	1881	1972
Натрий хлористый	1119	1160	1220	1269	1322	1400	1465	1536	1642	1733
Натрий Щ1анистый	1071	1115	1180	1233	1292	1380	1454	1537	1661	1770
Натрия гидрооксид	995,2	1036	1096	1147	1202	1283	1353	1430	1548	1650
Неодим	2001	2091	2223	2335	2458	2643	2803	2982	3259	3505
Неон	15,6	16,3	17,3	18,1	19,0	20,4	21,6	23,0	25,0	26,8
Нептуний [2]	2538	2636	2778	2895	3023	3211	3369	3543	3804	4028
Нептуний шестифторис-	236,8	243,6	253,1	260,9	269,2	280,9	290,5	300,8	315,5	327,7
Никель	1656	1710	1786	1849	1916	2012	2092	2178	2303	2408
Никель хлористый	932,8	957,5	992,3	1020	1050	1091	1125	1162	1213	1255
Никеля карбонил					233,7	248,8	261,6	275,8	297,0	315,4
Ниобий	3529	3642	3803	3934	4075	4277	4444	4625	4887	5106
Ниобий пятибромистый [90]	451,4	464,2	482,3	497,0	512,5	534,7	552,8	572,1	599,8	622,6
Ниобий пятифтористый	—	—	338,1	352,9	369,1	392,8	412,9	435,2	468,6	497,6
Ниобий пятихлористый [90, 91]	–	–	381,4	395,1	409,8	431,1	448,8	467,9	495,9	519,3
Нитрозил фтористый	137,9	143,0	150,4	156,6	163,2	172,9	181,1	190,1	203,4	214,7
Нитрозил хлористый			–	–	199,4	211,9	222,4	234,0	251,4	266,4
Озон	91,7	95,9	102,0	107,2	112,9	121,5	128,9	137,3	150,3	161,8
Октахлортрисилан	314,7	326,2	342,7	356,4	371,2	392,8	410,8	430,6	459,9	484,9
Олова гидрид	130,9	136,5	144,6	151,4	158,9	170,1	179,6	190,3	206,5	220,7
Олово	1853	1926	2031	2119	2215	2355	2474	2605	2802	2972
Олово бромное		308,5	325,4	339,4	354,7	377,2	396,2	417,2	448,6	475,7
Олово йодное		399,7	421,9	440,4	460,6	490,4	515,5	543,4	585,3	621,5
Олово сернистое [92]	1029	1062	1110	1149	1190	1250	1300	1354	1432	1497
Олово хлористое	578,0	599,1	629,4	654,4	681,6	721,1	754,2	790,5	844,1	
Олово хлорное	245,4	254,6	267,8	278,7	290,6	308,0	322,6	338,6	362,4	**382** >
Осмий	3475	3579	3727	3846	3974	4157	4306	4467	4699	4891
Осмия тетраоксид:										
белый	261,2	270,6	284,1	295,2	307,2	324,7	339,3	355,2	**378,8**	**398,8**
желтый	268,3	**277,2**	290,0	300,5	311,8	328,0	341,5	356,2	377,6	395,5
Палладий	2214	**2293**	2408	2502	2604	2752	2876	3012-	3212	3382
Пентаборан [93]	207,9	215,9	227,6	237,3	247,9	263,4	276,5	290,9	312,5	331,1
Пентадейтеоборан [93)	207,1	215,1	226,8	236,5	247,0	262,5	275,5	289,9	311,5	330,1
Перхлорилфторид [94, 95]	140,6	146,1	154,1	160,7	167,9	178,4	187,4	197,2	212,0	224,7
Платина	2772	2859	2983	3085	3193	3349	3478	3616	3817	**3985**
Платина шестифтористая [96]	230,6	238,2	249,0	257,8	267,3	281,0	292,3	304,5	322,4	**337,4**
Плутоний	2193	2278	2402	2505	2617	2782	2921	3075	3305	3503
Плутоний шестифтористый				261,7	270,4	282,9	293,2	304,2	320,1	333,3
Полоний	757,9	788,3	832,5	869 4	909,7	969,1	1019	1075	1159	1231
Протактиний	2937	3042	3193	3317'	3452	3648	3811	3990	4254	4478
Радий	1038	1084	1151	1208	1271	1365	1446	1537	1676	1800
Радон	125,4	130,7	138,3	144,7	151,7	162,1	170,9	180,8	195,8	208,8

	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	I	2	5	10	20	50	100
Рений семифтористый [97]	3972	4107	4299	4456	4626	4871	5074	5295	5619	5891
Рений шестифтористый [97]	226,5	234,6	246,1	255,6	265,8	280,7	293,1	306,7	326,7	343,7
Родия окситетрахлорид [98]	209,6	216,2	225,7	233,4	241,6	253,5	2-33,3	273,9	289,2	302,0
Родия семиокись	307,1	319,4	337,4	352,5	368,9	393,1	413,6	436,4	470,8	500,5
Родий	475,0	486,5	502,6	515,6	529,2	548,3	563,7	580,0	603,1	621,8
Ртути диметил [84]	2764	2851	2975	3075	3183	3338	3465	3603	3802	3968
Ртуть	227,7	236,6	249,4	260,0	271,6	288,6	303,0	318,8	342,5	362,9
Ртуть бромистая	399,2	414,3	436,1	454,1	473,8	502,5	526,6	553,2	592,7	626,6
Ртуть иодистая	399,9	412,9	431,5	446,7	463,0	486,5	505,9	526,9	557,6	583,2
Ртуть хлористая	420,6	434,5	454,3	470,5	487,9	513,0	533,7	556,3	589,1	616,7
Рубидий	403,5	415,8	433,3	447,5	462,7	484,5	502,3	521,6	549,4	572,4
Рубидий бромистый	555,4	580,3	616,9	647,8	681,9	733,0	777,0	826,6	902,9	970,6
Рубидий иодистый	1035	1074	ИЗО	1176	1227	1300	1362	1430	1530	1616
Рубидий фтористый	1002	1040	1094	1139	1188	1260	1320	1386	1485	1569
Рубидий хлористый	1149	1185	1235	1277	1321	1384	1436	1491	1572	1640
Рутений	1045	1085	1142	1189	1241	1317	1380	1451	1555	1644
Рутения тетраоксид [99, 100]	3170	3267	3404	3516	3635	3805	3945	4096	4313	4494
Самарий	261,1	270,5	284,0	295,1	307,1	324,6	339,3	355,3	378,9	399,0
Самарий хлористый [78]	1208	1252	1316	1369	1426	1510	1580	1657	1771	1868
Свинец	1460	1512	1587	1648	1714	1811	1891	1980	2109	2219
Свинец бромистый	1233	1284	1357	1418	1485	1584	1668	1761	1902	2024
Свинец иодистый	770,3	798,0	837,9	870,9	906,5	958,3	1001	1049	1119	1178
Свинец сернистый	735,4	762,1	800,6	832,4	866,8	917,0	958,9	1004	1072	ИЗО
Свинец фтористый	1105	1138	1185	1223	1263	1321	1368	1419	1492	1553
Свинец хлористый		1061	1114	1157	1204	1272	1329	1391	1483	1561
Свинца оксид	805,2	833,5	874,2	907,7	943,9	996,4	1040	1087	1158	1217
Селен	1199	1238	1293	1338	1387	1456	1514	1576	1666	1742
Селена диоксид	612,9	634,5	665,5	691,1	718,7	758,8	792,3	828,8	882,5	928,1
Селена оксихлорид	425,5	437,8	455,1	469,2	484,3	505,6	523,1	541,8	568,7	590,9
Селен четыреххлористый	304,4	314,2	328,2	339,7	352,0	369,7	384,3	400,1	423,1	442,3
Селен шестифтористый	343,2	352,4	365,3	375,7	386,8	402,4	415,1	428,7	448,0	463,8
I	152,6	157,8	165,3	171,5	178,1	187,7	195,6	204,3	217,0	227,7
I хлористая	445,8	463,0	487,7	508,3	530,6	563,4	591,0	621,5	666,9	706,0
Сера шестифтористая	260,3	270,0	284,1	295,8	308,5	327,1	342,7		385,3	407,2
	138,3	143,2	150,2	156,0	162,2	171,3	178,8	187 Л	199,2	209,5
иодистое	1578	1635	1718	1786	1861	1969	2059	2158	2305	2430
Серебро хлористое	1071	1115	1179	1233	1292	1379	1453	1535	1660	1768
кислота	1164	1208	1272	1325	1383	1467	1538	1616	1732	1832
Сернистый ангидрид	412,6	426,0	445,1	460,8	477,6	501,8	52Л,8	543,5	575,0	601,4
Серный ангидрид (а)	172,7	178,7	187,4	194,5	202,2	213,3	222,6	232,8	247,7	260,3
Серный ангидрид (р)	230,8	237,1	246,1	253,4	261,1	272,1	281,0	290,5	304,1	315,3
Серный ангидрид (7)	236,3	242,4	251,0	258,0	265,3	275,7	284,1	293,0	305,8	316,1
Сероводород	255,3	260,9	268,7	274,9	281,4	290,5	297,7	305,4	316,1	324,7
Силан [3, 1011	136,0	141,0	148,3	154,3	160,8	170,4	178,4	187,2	200,2	211,3
Синильная кислота	96,2	100,2	106,0	110,9	116,2	124,1	130,9	138,3	149,7	159,6
Спайки [102]	197,8	204,5	214,1	222,0	230,6	242,9	253,1	264,2	280,5	294,3
Стронций			169,4	177,1	185,6	198,2	208,9	220,8	238,9	254,6
Стронций хлористый [63]	9те,9	1020	1080	ИЗО	1185	1266	1335	1412	1529	1631
Стронция оксид	1553	1610	1693	1761	–	—	–	–	–	–
Сульфурил хлористый	2314	2370	2449	2512	2578	–	–	–	–	–
Сурьма		221,7	233,8	244,0	255,0	271,1	284,8	299,9	322,6	342,1
Сурьма пятифтористая	999,1	1051	1128	1195	1270	1385	1486	1604	1792	1967
Сурьма пятихлористая	271,9	281,7	295,7	307,3	319,8	338,0	353,2	369,9	394,4	415,3
Сурьма трехбромистая	291,3	301,8	317,0	329,6	343,1	362,9	379,5			—
Сурьма трехиодистая	362,2	374,2	393,2	408,3	424,6	448,2	467,9	489,5	521,1	547,9
Сурьма треххлористая	429,4	445,5	468,9	488,2	509,2	539,9	565,7	594 Л	636,3	672,5
Сурьмы триоксид	312,4	324,0	340,8	354,6	369,6	391,5	409,9	430,1	460,1	485,7
Таллий	778,0	821,1	886,1	942,5	1006	1105	1195	1300	1470	1633
Таллий бромистый	1086	1128	1190	1241	1297	1379	1448	1525	1640	1739
		711,4	749,6	781,4	816,0	866,7	909,4	956,6	1027	1087

	Давление пара, кПа									
	0.1	0,2	0,5	.	2	5	10	20	50	100
Таллий иодистый	699,1	725,2	762,8	794,0	827,7	877,1	918,5	964,1	1031	1089
Таллий пятифтористый	327,7	339,5	356,5	370,5	385,7	407,7	426,2	446,4	476,3	501,6
Таллий сернистый [89]	926,6	963,4	1016	1061	1110	1181	1242	1309	1409	1496
Таллий хлористый	—	707,4	744,9	776,1	809,9	859,5	901,2	947,2	1015	1074
Тантал	3925	4044	4213	4350	4496	4706	4878	5063	5331	5552
Тантал пятибромистый [90]	430,2	442,8	460,7	475,2	490,7	512,8	530,8	550,2	578,1	601,2
Тантал пятифтористый	—	—	—		—	367,5	392,0	419,8	463,4	502,9
Тантал пятихлористый [91, 103]	341,8	354,0	371,6	386,2	401,9	424,7	443,8	464,7	495,5	521,7
Теллур [3, 104-106]	775,0	806,1	851,4	889,1	930,4	991,2	1042	1099	1185	1260
Теллур четыреххлористый			479,6	497^5	516,9	544,8	568,1	593,4	630,6	662,0
Теллур шестифтористый	159,1	164,4	172,0	178,2	184,8	194,4	202,4	211,0	223,6	234,2
Тербий *[77]*	2350	2430	2520	2615	2730	2850	3060	3200	3410	3660
Тетраборан	179,1	186,2	196.5	205,1	214,5	228,3	239,9	252,8	272,2	288,9
Тетрагидропе нтаборан	219,6	227,7	239,4	249,0	259,5	274,8	287,6	301,6	322,4	340,2
Тетраметилгерьаний	195,9	203,6	214,8	224,1	234,3	249,2	261,9	275,9	296,8	314,9
Тетрасилан	241,2	250,0	262,7	273,1	284,5	301,0	314,8	330,0	352,5	371,6
Тетрафторгидразин	115,1	120.2	127.6	133,9	140,8	151,1	160,0	169,9	185,2	198,7
Технеций	3365			3750			4360		4699	4967
Технеций шестифтористый [107]	221,0	228,2	238,5	246,9	255,9	268,8	279,6	291,2	308,1	322,3
Технеция гептаоксид [108]	389,6	403,1	422,4	438,3	455,5	480,3	501,0	523,5	556,5	584,5
Тионилбромид	262,5	272,4	286,8	298,7	311.7	330,6	346,6	364,1	390,3	412,7
Тионилфторид [109]	146,7	152,1	159,9	166,3	173,3	183,4	192,0	201,3	215,2	227,0
Тионилхлорид	212,8	221,6	234,3	244,9	256,5	273,6	288,2	304,4	328,9	350,2
Титан	2450	2524	2630	2716	2807	2939	3046	3162	3330	3469
Титан четыреххлористый [ПО]	255.4	265.3	279,5	291.4	304,3	323.1	339,1	356,6	382,9	405,4
Торий	ЗОЮ	—	—	3340	—	—	3855	—	4308	4470
Трибромсилан	237,7	247,1	260,7	272,1	284,5	302,7	318,1	335,2	360,8	382,9
Трибромфторсилан	222,4	231,0	243,6	254,0	265,3	282,0	296,1	311,6	334,8	354,9
Тригерман	232,1	241,6	255,5	267,1	279,8	298,5	314,5	332,2	359,1	382,4
Трисилан	200,0	208,1	219,7	229,5	240,1	255,8	269,1	283,8	306,0	325,2
Трифторсилан	118,7	122,7	128,6	133,3	138,5	146,0	152,2	158,9	168,8	177,2
Трихлоргерман	227,3	235,4	247,0	256,5	266,9	281,8	294,3	308,0	328,1	—
Трихлорсилан	188,7	196.2	206,9	215,8	225,6	239,9	252,0	265,4	285,5	302,8
Углерод (графит)	3353	3480	3663	3814	3978	4219	4421	4644	4975	5258
Углерода диоксид	135,8	140,1	146,1	151,0	156,3	163,8	170,0	176,7	186,4	194,5
Углерода недокись fi1l]	173,7	180,5	190,4	198,5	207,5	220,6	231,6	243,8	262,1	277,9
Углерода оксид	49,8	51,8	54,7	57,0	59,7	63,5	66,7	70,4	75,8	80,4
Уран	2691	2788	2929	3045	3171	3354	3508	3676	3924	4136
Уран четыреxфтористый [112]	1202	1239	1292	1335	1381	1447	1502	1560	1645	1716
Уран шестифтористый	239,3	246,1	255,6	263,2	271,4	283,0	292,5	302,6	317,1	329,0
Лптгьнн	–	–	–	–	133,5	142,9	150,9	159,9	173,5	185,5
	226,4	232,8	241,8	249,0	256,8	267,7	276,6	286,2	299,9	311,1
	244,7	251,5	261,1	268,9	277,1	288,8	298,4	308,5	323,1	335,1
	179,4	184,3	191,3	197,0	203,0	211,5	218,5	225,9	236,5	245,2
	341,3	354,6	373,8	389,9	407,3	432,9	454,5	478,4	514,2	545,0
	503,3	517,4	537,1	553 ,'1	570,1	594,2	613,9	634,8	664,9	689,6
			258,5	269,6	281,6	299,4	314,3	330,9	355,6	376,9
Д (мерма)	456,6	469,6	487,9	502,8	518,6	541,0	559,4	579,0	607,2	630,4
д (стада)	650,1	666,3	688,8	707,0	726.1	753,0	774,7	797,7	830,3	856,8
Фосф(эмид	318,6	328,0	341,4	352,3	363,9	380,4	393,9	408,5	429,4	446,7
t орид	249,9	259,5	273,2	284,7	297,2	315,4	330,7	347,7	372,9	394,6
с] ид		291,8	307,5	320,6	334,8	355,6	373,2	392,6	421,6	446,5
Фосфор пятихлористый	323,0	331,3	343,0	352,4	**362,3**	376,4	387,7	399,8	416,9	430,9
Фосфор трехбромистый	275,4	286,3	302,3	315,6	**330,1**	351,4	369,5	389,5	419,6	445,7
Фосфор трех хлористый	217,0	225,5	237,7	247,8	258,9	275,1	288,8	303,9	326,5	345,9
Франций	486,8	509,4	542,8	571,1	602,6	649,8	690,8	737,4	809,4	874,0

Продолжение табл. 12.12

	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	.	2	5	10		50	100
фтор	49,7	51,9	55,1	57,7	60,7	65,1	68,8	73,0	79,4	85,1
фтора оксид	76,5	79,7	84,5		92,9	99,4	105,0	111,2	120,7	129,0
Фторсилан	116,6	120,5	126,2	13О!8	135,7	142,9	148,8	155,2	164,7	172,6
фтортрихлорсилан	176,5	183,4	193,5	201,8	210,9	224,3	235,6	248,1	266,8	282,9
Хлор	149,9	155,6	163,9	170,7	178,1	189,0	198,1	208,2	223,2	236,1
Хлора диоксид			201,7	209,5	217,9	230,1	240,3	251,4	267,9	281,8
Хлора оксид	171,8	178,5	188,3	196,3	205,2	218,1	229,0	241,1	259,2	274,7
Хлора гексаоксид	276,0	285,6	299,2	310,5	322,6	340,2	354,9	370,8	394,2	414,0
Хлорный ангидрид	224,5	232,9	245,2	255,3	266,3	282,5	296,0	310,9	333,1	352,2
Хлорсилан	151,7	157,6	166,0	173,0	180,6	191,7	201,1	211,4	226,8	240,1
Хлорсульфоновая кислота	300,8	309,8	322,6	333,0	344,1	359,9	372,9	386,8	407,0	423,6
Хлортрифторсилан	126,0	131,0	138,1	144,1	150,6	160,1	168,2	177,1	190,4	201,9
Хлор трехфтористый		178,5	188,9	197,5	207,0	221,1	233,1	246,4	266,5	284,1
Хлор фтористый		122,2	127,7	132,2	137,0	144,0	149,8	156,0	165,1	172,7
Хром	1939	2002	2093	2167	2247	2362	2457	2559	2709	2835
Хрома карбонил	305,6	314,5	327,0	337,1	347,8	363,2	375,7	389,1	408,4	424,3
Хромил хлористый	249,4	258,5	271,7		294,5	311,7	326,2	342,1	365,5	385,6
Цезий	532,1	556,5	592,3	***622,7***	656,3	706,8	750,4	799,8	876,0	944,1
Цезий бромистый	1003	1041	1095	1140	1189	1260	1320	1386	1484	1567
Цезий иодистый	993,5	1030	1083	1127	1175	1245	1304	1368	1464	1546
Цезий фтористый	966,5	1003	1055	1099	1146	1216	1274	1338	1433	1515
Цезий хлористый	1000	1038	1092	1137	1186	1257	1317	1383	1482	**1566**
Церий	2070	2152	'2270	2369	2477	2636	2770	2918	3141	**3334**
Цинк	750,4	778,9	820,2	854,4	891,6	946,1	991,9	1042	1117	1182
Цинка диметил [84]	201,7	209,2	220,0	229,0	238,7	Й52,8	264,7	277,8	297,2	313,8
Цинк бромистый [113]	636,5	657,2	686,7	710,8	736,7	773,9	804,6	838,0	886,5	927,1
Цинк сернистый [114]	1313	1352	1406	1451	1498	1566	1621	1680	–	–
Цинк фтористый	1475	1516	1573	1618	1667	1736	1792	1852	1938	2008
Цинк хлористый [3, 83,	"684,3	705,6	735,9	760,5	786,9	824,7	855,8	889,3	937,9	978,3
Цир'к^ии	3190	**3292**	3436	3554	3680	3861	4011	4172	4407	4603
Цирконий четырехбромистый	475,7	**487,6**	504,3	517,7	531,8	551,8	567,8	584,9	609,1	628,7
Цирконий четырехиодистый	531,5	544.8	563,5	578,5	594,3	616,6	634,6	653,6	680,7	702,7
Цирконий четыреххлористый	454,2	466,0	482,6	495,9	510,0	529,9	546,0	563,1	587,5	607,4

Таблица **11.4. Давление пара элементов и некоторых простейших соединений (выше Ю^ Па) при различной температуре [115]**

т, к	*р.* 10' Па	*Т.* к	*р,* 10» Па	*т,* к	р, Ю® Па 1	*Т.* К	р, 10= Па
Азот Щ		108	13,03	270	3,819	90	1,337
		110	14,67	280	5,518	92	1,622
		112	16,45	290	7,753	94	1,952
78	1,093	**114**	18,36	300	10,624	96	2,329
80	**1,369**	**116**	20,47	310	14,249	98	2,758
82	**1,694**	118	22,72	320	18,66	100	3,243
84	2,074	120	25,15	330	24,22	102	3,787
86	2,515	**122**	**27,77**	340	30,82	104	4,397
	3,022	**124**	**30,57**	360	38,70	106	5,074
90	3,600	**126**	**33,57**	370	58,91	108	5,825
92	4,256	126,25	33,96	380	71,54	ПО	6,652
94	4,995			390	86,06	112	7,562
	5,824	Аммиак NHg		**400**	102,8	114	8,557
98	6,748			**405,6**	113,0	116	9,643
100	7,775					118	10,82
102	8,910	240	1,0258	Аргон Аг		120	12,11
104	10,16	250	1,6536			122	13,49
106	11,53	260	2,559	88	**1,091**	124	14,99

m, к	*p,* па
126	16,60
128	18,33
130	20,20
132	22,19
134	24,32
136	26,31
138	29,04
140	31,64
142	34,41
144	37,36
146	40,50
148	43,83
150	47,39
Вода тяжелая D2O (*it,* X)	
110	1,3728
120	1,9134
130	2,6170
140	3,518
150	4,653
160	6,066
170	7,802
180	9,911
190	12,445
200	15,462
210	19,028
220	23,194
230	28,031
240	33,606
250	39,993
260	47,280
270	55,527
280	64,834
290	75,288
300	86,968
305	93,323
310	100,01
315	107,07
320	114,54
325	122,38
330	130,65
335	139,37
340	148,54
345	158,20
350	168,35
355	178,98
360	190,16
365	202,12
370	214,68
371	217,22
Водород Н,	
21	1,209
22	1,584
23	2,036
24	2,574
25	3,206
26	3,942
27	4,789
	5,755

T, К	р. 10= Па
29	6,848
30	8,077
30,5	8,747
31	9,455
31,5	10,20
32	11,00
32,5	11,84
33	12,73
33,23	13,16
Вольфрам шестифтористый H1DJ	
304,2	1,73
314,2	2,39
324,2	3,18
334,1	4,21
344,1	5,48
354,1	**7,02**
364,0	**8,80**
374,0	11,01
383,3	13,53
393.8	16,57
403,7	19,96
413,7	23,88
423,6	28,40
433,5	33,50
443,5	39,35
Гелий «Не [117]	
4,25	1,0401
4,30	**1,0894**
4,35	**1,1402**
4,40	1,1927
4,45	1,2468
4,50	1,3026
4,55	1,3601
4,60	1,4193
4,65	1,4803
4,70	1,5431
4,75	1,6078
4,80	1,6743
4,85	1,7427
4,90	1,8131
4,95	1,8855
5,00	**1,9600**
5,05	**2,0367**
5,10	2,1158
5,15	2,1976
5,19	2,2654
Калий к	
1050	1,217
1100	1,864
1150	2,745
1200	3,913
1250	5,415
1300	7,304
1350	9,628
1400	12,44

T. к	*p.* 10= Па
1450	16,1
1500	20,0
1550	24.6
1600	29,8
1650	35,6
1700	42,0
1750	49,2
1800	57,0
1850	65,4
1900	74,5
1950	84,3
2000	94,7
2050	105,6
2100	117,2
2150	**129,4**
2170	**134,4**
Кислород О2	
90,18	1,013
92	1,221
94	1,486
96	1,793
98	2,145
100	2,546
102	3,002
104	3,515
106	4,090
108	4,731
ПО	5,443
112	6,229
114	7,095
116	8,045
118	9,083
120	10,21
122	11,44
124	12,78
126	14,22
1-28	15,77
130	17,44
132	19,24
134	21,17
136	23,24
138	25,45
140	27,82
142	30,34
144	33,04
146	35,91
148	38,97
150	42,23
152	45,69
154,77	50,87
Криптон Кг	
120	1,031
122	1,202
124	1,395
126	1,610
128	1,849
130	2,114
132	2,406
134	2,728

T, К	р. 10= Па
136	3,080
138	3,465
140	3,884
142	4,339
144	4,832
146	5,364
148	5,938
150	6,556
152	7,218
154	7,928
156	8,687
158	9,497
160	10,36
Ксенон Хе	
166	1,071
168	1,199
170	1,337
172	1,488
174	1,651
176	1,827
178	2,017
180	2,222
182	2,442
184	2,678
186	2,930
188	3,200
190	3,487
192	3,794
194	4,119
196	4,465
198	4,832
200	5,220
202	5,631
204	6,064
206	6,522
208	7,004
210	7,511
212	8,045
214	8,605
216	9,194
218	9,810
220	10,46
222	11,13
224	11,84
Литий **Li**	
1650	1,283
1700	1,771
1750	2,399
1800	3,191
1850	4,179
1900	5,397
1950	6,871
2000	8,639
2100	12,4
2200	18,3
23C0	26,1
24C0	33,1
2500	49,1
2600	66,1

2700	87,1
2800	113,7
2900	146,5
3000	186,6
3100	235,4
3200	295,2
3300	365,8
3400	449,9
3500	550,5
3600	668,2
3700	806,7
3800	968,3

шестифтористый
MoFe [118]

323,2	**1,73**
333,2	2,36
343,2	3,15
353,2	4,15
363,2	5,33
373,2	6,79
383,2	8,52
393,2	10,50
403,2	12,90
413,2	15,63
423,2	18,72
433,2	22,33
443,2	26,25
453,2	30,70
463,2	35,90
473,2	41,75
483,2	48,55

Натрий Na

1200	1,504
1250	2,244
1300	3,216
1350	4,563
1400	6,256
1450	8,383
1500	11,014
1550	14,6
1600	18,6
1650	23,4
1700	29,0
1750	35,6
1800	43,0
1850	51,6
1900	61,2
1950	72,1
2000	84,1
2050	97,5
2100	112,1
2125	120,0

Неон Ne

	1,3210
	1,7351
	2,2381
	2,8402
	3,5526
	5,3518
	6,4618
	7,7282
	9,1637
	10,7820
	12,597
40	14,625
41	16,882
42	19,387
43	22,157
44	25,217
44,4	26,54

Ртуть Hg *(t,* °G)

360	1,0772
380	1,5207
400	2,1024
420	2,852
440	3,801
460	4,986
480	6,446
500	**8,222**
520	10,358
540	12,901
560	15,899
580	19,403
600	23.46
620	28,14
	33.47
	39,53
	46,36
700	54,03
720	62.59
740	72,10
7^0	**82.60**
780	94,17
800	106,85

Рубидий Rb

1000	1,467
1050	2,241
1100	3,295
1150	4,684
1200	6,466
1250	8,698
1300	11,43
1350	14,7
1400	18,6
1450	23,2
1500	28,5
1550	34.5

Сера шее SF,

278,65	14.86
285,22	17,61
293,31	21,51
303,37	27,26
313,29	33,79
317,10	36.87

Сернистый ангидрид SOg

—10	1,01
10	2,23
20	3,30
30	4,62
40	6,30
50	8,48
60	11,15
70	14,26
80	18,02
90	22,49
100	27,77
ПО	33,96
120	41,12
130	49,40
140	58,91
150	69,74
157,5	78,82

Углерода диоксид COj

216,55	5,18
220	**6,00**
225	7,34
230	8,91
235	10,75
240	**12,82**
245	15,18
250	17,87
255	20,85
260	24,21
265	27,87
270	32,03
273,15	34,839
274	35,633
275	36,576
276	37,543
277	38,521
278	39,520
279	40,547
280	41,588
281	42,654
282	43,732
	44,831
	45,956
	47,096
	48,261
	49,450
	50,666
	51,895
	53,148
290	54,432
291	55,732
292	57,066
293	58,421
294	59,802
	61,205
	62,639
	64,09«
	65,598
	67,115
300	68,661
301	

Г. к	*P.* 10= Па
302	70,246
303	71,858
304,19	73,815

Углерода оксид *CO (t, '*

-191,52	1,013
—187,79	1,520
—184,90	2,026
—182,55	2,532
—180,53	3,039
—177,04	4,052
-174,17	5,065
-171,69	6,078
-169,49	7,091
-167,46	8,104
—163,98	10,13
—161,02	12,16
-158,32	14,18
-155,94	16,21
-153,65	18,23
-151,70	20,26
-147,18	25,32
—143,30	30,39
-140,23	34,98

Уран шестифтористый UF.
[119]

364,0	3,33
374,0	4,28
383,8	5,44
393.8	6,84
403,7	8,47
413,7	10,38
423,6	12,59
433,5	15,15
443,5	18,01
453,4	21,28
463,3	24,98
473,2	29,13
483,2	33,93
493,0	39,08
502.9	45,08

Фтор Fa

95,0	2,775
97,5	3,465
100,0	4,282
102,5	5,236
105,0	6,340
107,5	7,602
110,0	9,029
112,5	10,63
115,0	12,41
117,5	14,39
120,0	16,59
122,5	19,03
125,0	21,73
127,5	24,70
130,0	27,98
132,5	31,59

Продолжент табл. 11.4

г. к	*р,* Ш♭ Ла	*Т.* К	*р.* 10^ Па	*т,* К	р. Ю' Па	*Т, к*	*р.* Ю^ Па
135,0	35,57	32,22	9,279	**Цезий Cs**		1500	***27,&***
137,5	39,93	43,33	12,207			1550	33,0
140,0	44,69	54,44	15,752	950	1,086	1600	38,9
142,5	49,87	65,56	19,997	1000	1,693	1650	45,4
144,0	53,25	76,67	25,011	1050	2,527	1700	52,4
Хлор Cl2	***ii, "C)***	87,78	30,886	1100	3,629	1750	60,0
		98,89	37,694	1150	5,038	1800	68,2
		110,00	45,544	1200	6,790	1850	77,0
-34,04	1,013	121,11	54,520	1250	8,889	1900	86,2
-23,33	1,580	132,22	64,751	1300	11,41	1950	96,0
— 12,22	2,411	137,78	70,363	1350	15,0	2000	106,3
-1,11	3,535	143,33	76,340	1400	18,7	2050	117,0
10,00	5,014	144,00	77,089	1450	22,9		
21,11	6,909						

11.3. ПАРЫ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Таблица 11.5. **Температура насыщения органических веществ,** К; /» = 0,1 ^ 100 **кПа** [3]

В таблице приведены значения температуры, при которой устанавливается указанное давление пара

	Давление пара. к1									
	0,1	0,2	0,5			5	10	20	50	100
Адипиновая кислота	425,8	438,9	457,6	472,8	489 1	512,4	531,6	552,3	582,2	607,1
Акриловая кислота	272, Ь	282,1	296.0	307,5	319^8	337,8	352,8	389,2	393,3	413,8
Акрилонитрил	217,5	226,1	238,4	248,7	259,9	276,4	290,3	305,7		348,7
Акролеин	204,3	212,1	223,4	232,8	243,0	258,0	270,6	284,5	305',3	323,1
Аллен	148,9	154,6	162,8	169,7	177,2	188,1	197,4	207,5	222,7	235,8
Аллилдихлорэтилсилан	265,1	275,4	290,1	302,4	315,8	335,3	351,8	370,1	397,2	420,6
Аллилизопропиловый эфир	225,5	233,9	246,1	256,1	267,0	283,0	296,4	311,1	332,9	351,5
Аллилизотиоцианат	267,8	278,1	293,0	305,4	318,8	338,5	355,1	373,5	400,8	424,3
Аллиловый спирт	249,4	257,7	269,7	279,5	290,1	305,3	318,0	331,7	351,8	368,7
Аллилпропиловый эфир	229,4	238,2	250,8	261,3	272,6	289,3	303,3	318,8	341,8	361,5
Аллилтрихлорсилан	248,8	258,1	271,5	282,6	294,6	312,2	327,0	343,3	367,4	388,0
Амилизопропионат	276,7	287,1	302,0	314,4	327,8	347,5	364,0	382,1	409,0	432,1
Амиловый спирт	281,5	290,5	303,3	313,8	325,1	341,2	354,6	369,0	**390,0**	407,5
трет-Амиловый спирт	256 ;з	264,6	276,4	286,1	296,5	311,5	323,9	337,3	**356,8**	373,1
Амилтриметилсилан	258,8	268,8	283 1	295^0	308,0	327,0	342,9	360,6	386,9	409,5
Анизол	273,3	283,5	298^3	310,5	323,8	343,2	359,4	377,3	403,9	426,7
Анилин	300,4	310,9	325,9	338,3	351,7	371,1	387,2	404,8	430,7	452,6
2-Анилинэтанол	371,3	383,8	401,8	416,5	432,4	455,3	474,3	495,0	525,2	550,7
Анисовый альдегид	340,5	352,7	370,2	384,6	400,3	422,9	441,9	462,6	493,2	519,2
Ацетальдегид	187,9	194,8	204,8	213,1	222,0	235,1	246,1	258,1	276,0	291,2
Ацетальдоксим	263,1	271,8	284,3	294,5	305,4	321,2	334,3	348,4	369,1	386,5
Ацетамид	332,6	343,8	359,9	373,1	387,3	407,8	424,8	443,3	470,4	493,2
Ацетанилид	380,9	394,2	413,4	429,2	446,3	471,0	491,6	514,1	547,2	575,2
Ацетилен	127,8	132,1	138,2	143,2	148,5	156,3	162,7	169,6	179,8	188,4
Ацегон	209,7	217,5	228,9	238,3	248,5	263,4	275,9	289,7	310,2	327,7
Ацетонитрил	221,5	230,0	242,5	252,8	264,1	280,6	294,5	309,9	332,9	352,6
Ацетофенон	304,5	315,8	332,1	345,5	360,1	381,5	399,4	419,0	448,2	473,0
Бензальдегид	292,6	303,1	318,1	330,6	344,0	363,5	379,9	397,7	424,1	446,4
Бензиламин	296,8	307,5	323,0	335,7	349,5	369,6	386,4	404,9	432,1	455,2
Бензилдихлорсилан	312,9	323,5	338,7	351,2	364,7	384,1	400,2	417,8	443,5	465,1
Бензилизотиоцианат	347,0	358,8	375,5	389,3	404,1	425,5	443,2	462,5	490,8	514,6
Бензиловый спирт	323,6	334,1	349,2	361,5	374,8	393,9	409,6	426,7	451,6	472,5
Бензоил хлористый	299,7	310,9	327,1	340,5	355,0	376,3	394,2	413,8	443,0	468,0
Бензойная кислота	360,9	372,2	388,4	401,6	415,7	435,9	452,6	470,6	496,7	518,5
Бензол	229,3	237,3	248,9	258,4	268,7	283,6	296,0	309,5	329,5	346.4
Бензолсульфонилхлорид	333,1	345,7	363,8	378,9	395,2	419,1	439,2	461,3	494,2	522,4
Бензонитрил	312,0	323,3	339,6	353,1	367,7	388,9	406,6	426,1	454,8	479,3

	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	so	100
Бистрихлорсилан	—	—	331,0	344,7	359,5	381,2	399,4	419,5	449,3	474,8
Боринкарбонил	131,3	136,3	143,7	149,8	156,4	166,1	174,3	183,3	196,8	208,5
4-Броманизол	316,3	328,1	345,2	359,3	374,7	397,1	416,0	436,7	467,5	493,8
Бромбензол	270,8	281,1	295,9	308,2	321,6	341,2	357,6	375,8	402,7	425,9
1-Бромбутан	235,5	244,5	257,6	268,4	280,2	297,5	312,0	328,1	352,0	372,6
1-Бром-2-бутанол	292,5	301,5	314,3	324,8	335,9	351,9	365,0	379,2	399,7	**416,7**
1-Бром-2-бутанон	274,6	284,4	298,4	310,0	322,6	340,8	356,0	372,7	397,2	**418,1**
1(ыс-2-Бром-2-бутен	229,4	238,3	251,1	261,8	273,4	290,4	304,8	320,7	344,4	364,7
транс-2-Бром-2-бутен	223,5	232,2	244,8	255,2	266,6	283,3	297,4	312,9	336,2	356,2
2- Бром-4,6-дих лорфенол	351,4	364,1	382,5	397,6	414,0	437,9	457,9	479,7	512,1	539,6
Бромистый бензоил	314,6	326,3	343,2	357,2	372,3	394,5	413,1	433,5	463,9	489,8
2-Бром-1,4-ксилол	304,8	316,3	332,8	346,5	361,3	383,0	401,3	421,4	451,2	476,7
1-Бром-3-метилбутан	247,7	257,2	270,8	282,2	294,5	312,5	327,8	344,5	369,5	390,9
2- Бром-2- нитроизопропан	235,3	243,5	255,3	265,0	275,4	290,6	303,2	317,0	337,2	354,3
3-Бромпиридин	284,3	295,0	310,3	323,0	336,8	357,0	373,9	392,5	420,2	443,8
1-Бромпропан	215,6	226,9	235,9	245,8	256,7	272,5	285,9	300,7	322,7	341,6
2-Бромпропан	207,0	215,1	226,8	236,5	247,1	262,7	275,9	290,4	**312,1**	330,9
к-Бромтолуол	299,8	311,1	327,4	341,0	355,7	377,2	395,3	415,2	**444,8**	470,1
2-Бромтолуол	291,4	302,1	317,4	330,1	343,9	364,0	380,8	399,2	426,4	449,7
3-Бромтолуол	287,4	298,6	314,8	328,4	343,1	364,7	383,0	403,1	433,3	459,4
4-Бромтолуол	283,2	294,6	311,1	324,9	340,0	362,3	381,2	402,2	433,7	461,0
3-Бром-2,4,6-трих лорфенол	380,2	393,8	413,2	429,3	446,6	471,8	492,8	515,8	549,7	578,5
Бромуксусная кислота	322,7	333,6	349,3	362,2	376,0	396,1	412,7	430,8	457,3	479,6
1,4-Бромхлорбензол	299,7	310,9	327,1	340,5	355,1	376,3	394,2	413,8	442,9	467,9
1-Бром-1-хлорэтан	230,6	238,7	250,4	260,1	270,5	285,6	298,2	311,9	332,2	349,3
1-Бром-2-хлорэтан	239,6	248,7	261,9	272,8	284,7	302,1	316,7	332,8	356,8	**377,4**
1-Бром-4-этилбензол	292,9	305,0	322,6	337,3	353,5	377,3	397,7	420,3	454,5	**484,3**
(2-Бромэтил)-бензол	315,4	327,1	344,0	357,9	373,0	395,1	413,7	434,0	464,2	**490,0**
1-Бромэтилен	174,3	181,5	192,0	200,7	210,2	224,4	236,4	249,8	270,0	**287,6**
2-Бромэтиловый-2-хлор-этиловый эфир	304,2	315,2	331,1	344,1	358,3	378,8	396,1	414,9	442,8	466,4
(2-Бромэтил)-циклогексан	305,6	317,2	334,1	348,0	363,2	385,5	404,2	424,8	455,6	482,0
1.2-Бутадиен	179,9	186,9	197,2	205,8	215,1	228,8	240,4	253,2	272,4	289,0
1,3-Бутадиен	166,6	173,2	182,6	190,5	199,0	211,6	222,2	234,0	251,6	266,7
Бутан	168,0	174,6	184,2	192,3	201,0	213,8	224,7	236,7	254,7	270,3
1,3-Бутандиол	299,0	311,3	329,1	343,9	360,2	384,3	404,7	427,5	461,8	491,6
2,3-Бутандиол	312,4	322,5	337,0	348,8	361,4	379,7	394,7	411,0	434,8	454,6
2-Бутанон	220,3	228,8	241,1	251,3	262,5	278,9	292,6	307,9	330,6	350,2
1,2,3-Бутантриол	370,3	382,3	399,3	413,2	428,1	449,5	467,2	486,4	514,2	537,5
1-Бутен	164,8	171,3	180'6	188,5	197,0	209,5	220,1	231,9	249,4	264,6
Час-2-Бутен	172,6	179,3	188,9	196,9	205,6	218,4	229,2	241,1	258,8	274,1
тракс-2-Бутен	169,8	176,4	186,0	194,0	202,7	215,5	226,3	238,2	256,1	271.4
Бутеиин	176,1	182,7	192,3	200,2	208,8	221,5	232,1	243,7	261,1	275,9
3-Бутеннитрил	248,7	258,1	271,6	282,8	294,9	312,7	327,6	344,1	368,5	
Бутакрилат	267,4	277,4	291,9	303,9	316,9	335,9	351,9	369,4	395.5	417^9
втор- Бутилгли колат	296,3	306,8	321,8	334,1	347,5	366,8	383,0	400,6	426,5	448,5
Бутиловый спирт	268,1	276,7	289,0	299,1	309,9	325,4	338,2	352,0	372,2	389,0
етор-Бутиловый спирт	256,8	265,0	276,6	286,1	296,2	310,8	322,9	335,9	354,8	370,6
трет-Бутиловый спирт	247,9	255,5	266,4	275,2	284,6	298,1	309,2	321,1	338,4	352,8
Бутилтриметилсилан	244,8	254,1	267,5	278,7	290,8	308,5	323,5	339,9	364,4	385,4
Бутилформиат	242,2	251,2	264,2	275,0	286,7	303,8	318,1	333,9	357,3	377,3
етор-Бутилформиат	234,3	243,0	255,6	266,0	277,4	293,9	307,8	323,0	345,7	365,1
трет-Бутилформиаг	235,6	244,4	257,2	267,8	279,3	296,1	310,3	325,8	348,9	368,7
втор- Бутилхлорацетат	285,0	295,3	310,3	322,7	336,1	355,6	371,9	389,8	416,3	438,9
етор-Бутилхлорид	208,8	217,3	229,5	239,8	251,0	267,4	281,4	297,0	320,4	340,7
трет- Бутилхлорид	–	–	–		236,9	252,8	266.3	281,3	303,9	323,6
1-Бутин	176,7	183,5	193,2	201,4	210,2	223,2	234,1	246,1	264,0	279,4
2-Бутии	194,7	201,5	211,4	219,5	228,3	241,1	251,7	263,3	280,4	294,8
Бутиронитрил	248,1	257,4	270,8	282,0	294,0	311,7	326,5	342,8	367,0	387,7
Валериановая кислота	310,9	321,2	335,9	347,9	360,9	379,5	395,0	411,7	436,2	456,7
а-Вареролактон	304,3	315,8	332,4	346,1	361,1	382,9	401,2	421,4	451,4	477,2
Валеронитрил	262,3	272,2	286,5	298,3	311,2	330,0	345,9	363,3		411,4

Продолжение табл. 12.12

Вещество	Давление пара, кПа									
	0.)	0.2	0.5		2	5	10	20	50	IQQ
Ванилии	374,7	387,5	405,7	420,7	436,8	460,1	479,4	500,5	531,3	557,3
Виинлацетат	221,2	229,4	241,4	251,2	261,9	277,5	290,7	305,1	326,5	344,8
Вин илтрихлорсилан		–	246,6	257,4	269,2	286,5	301,1	317,4	341,7	362,8
Винилтриэтоксисилоксан		–	304,3	316,5	329,8	349,2	365,4	383,2	409,6	432,2
1,5-Гексадиеи-3-ин	223,5	232,1	244,6	255,0	266,2	282,8	296,7	312,1	335,1	354,9
Гексаметилдисилоксан		248,5	261,1	271,6	282,9	299,4	313,2	328,3	350,8	369,9
Гексаметилциклотрисилоксан	_	-	–	–	–	330,5	345,4	361,8	386,0	406,6
Гексан	214,6	***222,S***	234,6	244,4	255,1	270,8	284,0	298,5	320,1	338,7
1-Гексанол	292,5	302,1	315,8	327,0	339,0	356,3	370,6	386,1	408,7	427,6
2-Гексанол	281,7	290,8	303,7	314,3	325,6	342,0	355,4	370,0	391,3	409,0
3-Гексанол	271,3	280,7	294,2	305,3	317,2	334,6	349,0	364,7	387,8	407,3
2-Гексанон	276,4	285,2	297,7	308,0	318,9	334,6	347,6	361,6	382,0	399,0
Гексахлорбензол	382,9	396,7	416,5	432,8	450,4	476,1	497,5	521,0	555,6	585,0
Гексахлорэтаи	298,7	309,6	325,3	338,2	352,2	372,6	389,7	408,4	436,1	459,7
1-Гексен	211,2	219,4	231,3	241,2	251,9	267,7	281,0	295,7	317,6	336,6
Гептан	234,4	243,3	256,1	266,7	278,3	295,2	309,5	325,1	348,5	368,5
1-Гептанол	308,9	318,7	332,5	343,9	356,0	373,4	387,7	403,1	425,6	444,3
2-Гептанои	289,1	298,7	312,3	323,4	335,4	352,6	366,9	382,4	405,0	424,0
4-Гептанои	291,7	300,7	314,3	323,8	334,9	350,8	363,9	378,0	398,4	415,3
2-Гептен	232,7	241,6	254,6	265,4	277,1	294,3	308,7	324,7	348,6	369,1
Гидрохинон	392,4	404,0	420,5	433,9	448,1	468,5	485,2	503,1	528,9	550,2
Гликольацетат	306,0	316,8	332,2	344,8	358,5	378,3	394,8	412,9	439,4	461,8
Глицерин	391,7	403,7	420,7	434,6	449,4	470,7	488,1	506,9	534,1	556,6
Глутаровая кислота	423,8	435,2	451,4	464,4	478,2	497,7	513,6	530,5	554,7	574,5
Глутаровый ангидрид	368,5	381,5	400,2	415,7	432,4	456,6	476,8	498,8	531,4	558,9
Глутаронитрил	357,9	371,2	390,4	406,2	423,5	448,6	469,7	492,9	527,3	556,7
Глутерилхлорид	324,0	335,4	351,7	365,1	379,5	400,5	418,0	437,0	465,1	488,8
Дегидрацетовая кислота	359,0	371,4	389,4	404,1	420,0	443,0	462,2	483,1	513,9	539,9
Диаллидихлорсилан	277,2	287,6	302,8	315,4	329,0	349,0	365,8	384,3	411,8	435,4
Диаллилсульфид	258,6	268,5	282,9	294,8	307,8	326,8	342,8	360,5	386,8	409,4
Диацетамид	336,7	347,8	363,6	376,7	390,6	410,8	427,5	445,5	471,9	494,1
1,4-Дибромбензол	320,7	331,9	347,9	361,1	375,4	396,0	413,2	432,0	459,6	482,9
1,2-Дибромбутан	275,4	286,1	301,4	314,2	328,1	348,4	365,6	384,6	412,8	437,2
^/-2,3-Дибромбутан	272,5	283,0	298,1	310,7	324,4	344,5	361,4	380,1	407,9	431,8
шзо-2,3-Дибромбутан	269,6	280,0	295,0	307,5	321,1	341,0	357,8	376,3	404,0	427,8
1,4-Дибромбутан	299,5	310,7	326,9	340,4	355,0	376,3	394,2	413,9	443,2	468,2
а, ji-Диброммалеиновый ангидрид	317,8	329,3	345,7	359,3	374,1	395,5	413,4	433.0	461,9	486,6
Дибромметан	234,0	242,9	255,8	266,5	278,2	295,2	309,6	325,4	349,0	369,2
1.2-Дибром-2-метилпропан	238,5	249,3	265,0	278,4	293,1	315,2	334,2	355,7	388,7	418,0
1.3-Дибром-2-метилпропан	282,0	292,6	308,0	320,7	334,6	354,8	371,8	390,5	418,3	442,2
1,2-Дибромпентан	287,9	298,5	313,7	326,3	340,0	359,9	376,6	394,9	422,0	445,2
1.2-Дибромпропан	261,1	271,0	285,4	297,3	310,2	329,1	345,1	362,6	388,8	411,2
2.3-Дибром-1-пропанол	324,5	335,9	352,2	365,7	380,2	401,3	418,9	438,1	466,3	490,2
2,3-Дибромпропилен	262,1	272,1	286,4	298,4	311,3	330,3	346,2	363,8	389,9	412,3
1,2-Дибромэтан	245,6	255,9	270,9	283,5	297,3	317,7	335,2	354,6	384,1	409,9
(1,2-Дибромэтил)-бензол	353,8	365,8	382,9	397,0	412,1	434,0	452,2	471,9	500,8	525,1
Ди-(2-бромэтиловый) эфир	315,1	326,5	342,8	356,4	371,0	392,3	410,1	429,6	458,4	482,9
Дибутилдисульфид	299,5	315,2	338,8	359,1	382,0	417,1	448,3	484,6	542,6	596,6
Дибутилсульфид	292,5	1 303,4	319,2	332.2	346,3	367,0	384,3	403,4	431,7	455,9
Диизобутиламин	263,1	273,0	287,2	298,9	311,7	330,4	346,1	363,3	388,9	410,8
Диизопропиловый эфир	211,7	219,9	231,8	241,8	252,6	268,4	281,8	296,6	318,7	337,8
Диизопропилоксалат	311,2	321,9	337,2	349,8	363,3	382,9	399,2	417,0	443,0	465,0
Диметиламин	181,6	188,2	197,6	205,4	213,9	226,1	236,4	247,6	264,2	278,3
N, Л'-Диметиланилин	297,4	308,6	324,6	338,0	352,4	373,6	391,3	410,9	439,9	464,7
Диметиларсанилат	283,5	293,6	308,2	320,2	333,2	352,0	367,8	385,1	410,5	432.1
2,2-Диметилбутан	199,6	207,4	218,8	228,2	238,5	253,6	266,4	280,5	301,6	319,9
2,3-Диметилбутан	205,3	213,3	224,9	234,6	245,1	260,6	273,6	288,1	309,7	328,3
2,2-Диметилгексан	238,8	247,9	261,0	272,0	283,8	301,2	315,9	332,0	356,1	376,7
2,3-Диметилгексан	244,9	254,2	267,6	278,8	290,9	308,6	323,5	340,0	364,4	385,4

Продолжение табл. 12.11

Вещество	Давление пара, кПа									
	0.1	0,2	0,5		2	5	10	20	ЙО	юс
2,4-Диметилгексан	239,6	248,9	262,2	273,3	285,4	303,1	318,0	334,5	359,0	380,2
2,5-Диметилгексан	241,1	250,2	263,4	274,3	286,2	303,5	318,1	334,2	358,1	378,6
3,3-Диметилгексан	241,7	250,9	264,3	275,3	287,3	304,9	319,8	336,1	360,4	381.3
3,4-Диметилгексан	245,9	255,2	268,8	280,0	292,2	310,0	325,1	341,6	366,3	387,4
Диметилборан	163,4	170,1	179,8	188,0	196,9	210,1	221,2	233,7	252,5	268,8
Диметилдихлорсилан			233,0	243,2	254,3	270,6	284,4	299,8	322,7	342.6
Диметилитаконат	337,6	347,9	362,7	374,7	387,5	405,9	420,9	437,2	460,7	480,2
Диметил-/-малат	342,5	354,4	371,4	385,4	400,5	422,4	440,6	460,5	489,6	514,3
Диметилмалеат	313,8	324,9	340,9	354,1	368,3	388,9	406,1	425,0	452,7	476,2
Диметилмалонат	302,9	313,3	328,2	340,4	353,5	372,6	388,4	405,6	430,9	452.2
троне-Диметилзаконат	315,0	326,1	342,1	355,2	369,4	390,1	407,3	426,0	453,7	477.1
Диметиловый эфир	154,8	160,9	169,7	177,1	185,1	196,9	206,9	217,9	234,5	248,8
Диметилоксалат	288,0	298,1	312,6	324,5	337,4	356,0	371,6	388,6	413,5	434,7
2,2-Диметилпентан	219,7	228,2	240,4	250,6	261,7	277,9	291,6	306,7	329,3	348.7
2,3-Диметилпентан	226,6	235,3	248,0	258,5	269,9	286,7	300,8	316,5	339,8	359.8
2,4-Диметилпентан	220,8	229,3	241,6	251,8	262,9	279,2	292,9	308,0	330,5	349,9
3,3-Диметилпентан	222,7	231,4	244,0	254,5	265,9	282,6	296,8	312,4	335,9	356,0
2,5-Диметил-3-пентанон	273,9	282,6	295,0	305,2	316,0	331,6	344,5	358,4	378,6	395.4
3,5-Диметил-1,2-пирон	346,1	357,9	374,8	388,7	403,6	425,1	443,1	462,6	491,1	515.2
2,2-Диметилпропан	167,2	174,3	184,7	193,4	203,0	217,2	229,3	242,9	263,5	281,5
4,6-Диметилрезорцин	316,7	328,1	344,7	358,3	373,1	394,6	412,6	432,3	461,4	486.2
Диметилсилан	154,6	160,8	169,8	177,4	185,6	197,7	208,0	219,5	236,6	251.5
Диметилсульфид	193,8	201,2	212,0	220,9	230,6	244,7	256,7	269,9	289,5	306.4
Диметилсурьма	311,9	323,4	339,9	353,6	368,5	390,1	408,3	428,2	457,7	482,9
Диметил-бг/-тартрат	367,2	380,0	398,5	413,7	430,0	453,8	473,6	495,2	527,0	553,9
Димегил-й-тартрат	369,2	381,9	400,0	414,8	430,8	454,0	473,3	494,3	525,0	550,9
3,3-Диметил-2-тиобутан	233,8	242,7	255,5	266,1	277,6	294,5	308,7	324,3	347,6	367,5
Диметилфенилсилан	272,7	283,1	298,0	310,5	324,0	343,8	360,4	378,8	406,1	429,6
1,1-Диметилциклогексан	244,2	253,6	267,3	278,7	291,2	309,4	324,7	341,7	367,1	388,9
цисЛ ,2-Диметилцикло-	251,6	261,3	275,3	286,9	299,5	318,5	333,6	350,8	376,5	398,5
трснс-1,2-Диметилцикло-	246,9	256,5	270,4	281,9	294,4	312,8	328,3	345,5	371,1	393,1
цисЛ ,3-Диметилцикло-	248.4	257,9	271,7	283,2	295,7	314,0	329,4	346,4	371,8	393,7
шрскс-1,3-Дйметилцикло-	245,5	254,9	268,5	279,8	292,2	310,2	325,4	342,2	367,2	388.7
^(^^ч ,4-Диметилцикло-	247,9	257,5	271,4	282,9	295,4	313,7	329,2	346,3	371,8	393,8
шро«Е•-1 ,4-Диметилцикло-	243,7	253,2	266,9	278,3	290.8	309,0	324,4	341,5	366,9	388,8
Диметилцитракои ат	318,6	329,8	345,9	359,1	373,4	394,1	411,3	430,1	457,9	481,3
ct. а-Диметилянтарный а ангцдрвд	328,7	340,0	356,1	369,3	383,6	404,2	421,3	440,0	467,3	490,4
1,2-Диметоксиэган	220,3	229,4	242,6	253,6	265,6	283,4	298,6	315,5	340,9	363,1
Ди- (2- метоксиэти л о в ый) эфир	281,0	291,2	305,8	317,8	330,9	349,8	365,7	383,0	408.7	430,5
Ди-(нитрозометил)-амин	270,8	281,0	295,7	307,9	321,1	340,5	356,7	374,6	401,2	424,0
Ди-(нитрозоэтил)-амин	285,8	296,6	312,1	324,9	338,9	359,3	376,5	395,4	423,4	447,5
1,4-Диоксан	234,7	243,8	257,0	267,9	279,8	297,2	311,9	328,1	352,3	373,2
1,4-Диоксан-2,6-дион		352,5	369,4	383,4	398,4	420,3	438,4	458,2	487,3	511,9
Дипро пилен г ли коль	342,4	353,8	370,0	383,3	397,6	418,2	435,3	453,8	480,9	503,6
Дипропиловый эфир	225,5	234,3	247,0	257,5	269,0	285,9	300,2	315,9	339,4	359.7
Дипропилоксалат	320,4	331,7	347,8	361,1	375,5	396,3	413,7	432,6	460,5	484,1
1,2-Дипропоксиэтан	228,0	239,8	257,3	272,4	289,3	315,2	338,1	364,6	406,8	445.8
1,1-Дифторэтан	157,9	163,7	172,1	179,1	186,6	197,6	206,8	217,0	232,0	244.8
1,2-Дихлорбензол	287,7	298,4	314,0	326,9	340,9	361,3	378,5	397,4	425,5	449,5
1,3-Дихлорбензол	280,3	291,0	306,6	319,5	333,5	354,1	371,4	390,6	419,1	443,6
1,4-Дихлорбензол	–	–	309,2	322,1	336,1	356,6	373,9	393,0	421,3	445,7
1,2-Дихлорбутан	244,1	253,8	267,9	279,6	292,3	311,1	327,0	344,6	371,0	393,9
2,3-Дихлорбутан	243,1	252,5	266,1	277,4	289,6	307,7	322,9	339,7	364,8	386,3
1,5-Дихлоргексаметилтри-1илоксан	293,6	304,4	320,0	332,9	346,8	367,2	384,3	403,0	430,8	454,5

продолжение табл. 12.3

Вещество	Давление пара, кПа									
	0.1	0.2	0,5	1	2	5	IC	20	50	100
Дих лордиизопропиловый эфир	297,6	308,2	323,5	336,1	349,7	369,5	386,0	404,0	430,7	453,3
Дихлордиметилсилан	216,0	224,2	236,1	246,0	256,7	272,4	285,6	300,2	321,9	340,6
Дихлордифторметан	151,7	157,6	166,1	173,1	180,8	192,1	201,6	212,1	227,8	241,3
1,2-Дихлор-1,2-дифтор-	187,5	194,5	204,5	212,8	221,9	235,0	246,1	258,2	276,2	291,6
Дихлордиэтилсилан	258,8	268,3	282,1	293,4	305,7	323,7	338,7	355,2	379,7	400,5
Дихлорметан	199,4	206,9	217,7	226,6	236,3	250,5	262,4	275,5	295,0	311,6
Дихлорметиларсан	256,4	266,2	280,4	292,1	304,9	323,6	339,4	356,7	383,6	404,8
1,1-Дихлор-2-метилпро-	237,9	247,1	260,3	271,4	283,4	301,0	315,9	332,3	356,7	377,8
1,2-Дихлор-2-метилпропан	242,7	251,7	264,8	275,6	287,3	304,4	318,8	334,6	358,1	378,1
1,3-Дихлор-2-метилпро-	265,7	275,3	289,0	300,4	312,7	330,7	345,6	362,0	386,3	406,9
Дихлорметилсилан	193,7	201,4	212,5	221,7	231,8	246,7	259,2	273,1	293,9	311,9
Дихлорметилфенилсилан	302,9	314,4	330,9	344,6	359,6	381,4	399,7	419,9	450,0	475,8
1,7-Дихлорокт0метилгет-расилоксан	320,4	332,1	348,8	362,7	377,7	399,6	417,9	438,0	467,7	493,0
1,2-Дихлорпропан	230,3	239,2	252,2	262,9	274,7	291,9	306,4	322,5	346,5	367,1
1,3-Дихлор-2-пропанол	295,6	305,9	320,7	332,8	346,0	365,0	380,9	398,2	423,6	445,1
2,3-Дих лорстирол	328,1	340,1	357,4	371,6	387,1	409,6	428,5	449,2	479,8	505,9
2,4-Дихлорстирол	320,7	332,5	349,5	363,5	378,7	400,9	419,5	439,9	470,1	495,9
2,5-Дих лорстирол	322,3	334,1	351,2	365,3	380,5	402,8	421,4	441,9	472,2	498,0
2,6-Дих лорстирол	315,3	326,9	343,7	357,5	372,5	394,4	412,8	432,9	462,7	488,2
3,4-Дих лорстирол	324,3	336,2	353,4	367,5	382,9	405,3	424,0	444,6	475,0	501,0
3,5-Дихлорстирол	321,3	333,0	350,0	363,9	379,1	401,2	419,7	440,0	470,0	495,6
1,3-Дихлортетраметилди-силоксан	260,8	270,6	284,7	296,4	309,2	327,8	343,4	360,6	386,1	408,0
1,2-Дихлор-1,1,2,2-тетра-	174,2	180,8	190,4	198,3	207,0	219,6	230,2	241,9	259,3	274,3
Дихлор-4-толилсилан	313,4	324,1	339,4	352,0	365,5	385,1	401,3	419,0	444,9	466,8
а, а-Дихлортолуол	302,3	314,1	331,3	345,5	361,1	383,9	403,2	424,6	456,5	484,1
3,4-Дихлор-а, а, а-три-фтортолуол	279,8	290,7	306,5	319,7	334,0	355.0	372,8	392,4	421,8	447,1
Дихлоруксусная кислота	311,6	322,3	337,6	350,2	363,8	383,4	399,7	417,5	443,6	465,6
Дихлорфениларсин	332,9	345,8	364,5	380,1	397,0	421,8	442,8	465,9	500,5	530,3
а, а-Дихлорфенилацето-нитрил	323,4	335,0	351,7	365,5	380,4	402,1	420,2	440,0	469,3	494,2
2,4-Дихлорфенол	320,6	331,7	347,6	360,6	374,7	395,1	412,1	430,5	457,7	480,6
2,6-Дихлорфенол	327,0	338,3	354,6	368,0	382,4	403,3	420,7	439,6	467,5	491,0
Дихлорфторметан	178,5	185,2	195,0	203,1	211,9	224,8	235,6	247,5	265,3	280,5
1,2-Дихлорэтан	224,6	233,1	245,4	255,7	266,7	283,0	296,6	311,7	334,0	353,2
1,2-Дихлор-3-этилбензол	313,7	325,6	342,8	357,0	372,5	395,2	414,3	435,4	466,7	493,5
1,2-Дихлор-4-этилбензол	315,0	327,1	344,7	359,2	375,0	398,2	417,8	439,4	471,5	499,2
1,4-Дихлор-2-этилбензол	306,3	318,3	335,6	350,0	365,6	388,7	408,1	429,6	461,8	489,5
1,1 -Дихлорэтилен	192,1	199,4	210,0	218,7	228,2	242,0	253,7	266,6	285,7	302,1
цис-1 ,2-Дихлорэтилен	211,2	219,1	230,5	239,9	250,2	265,2	277,8	291,6	312,1	329,7
транс-1,2-Дихлорэтилен	204,0	211,6	222,6	231,6	241,5	255,9	268,0	281,3	301,0	317,9
Ди-(хлорэтилевый) эфир	291,1	301,7	317,1	329,8	343,5	363,5	380,3	398,7	425,9	449,1
1,2-Дихлортрихлорсилан	–	–	314,9	328,0	342,1	362,9	380,3	399,5	428,0	452,5
Дихлорэтилфенилсилан	315,4	327,4	344,8	359,2	374,8	397,7	417,0	438,2	469,9	497,0
Ди-(2-хлорэтокси)-метан	320,5	331,8	348,2	361,6	376,1	397,2	414,8	434,1	462,4	486,4
Дихлорэтоксиметилсилан	235,3	244,2	257,2	267,9	279,6	296,7	311,1	326,9	350,5	370,8
Дихлорэтоксифенилсилан	319,3	330,9	347,7	361,6	376,6	398,6	416,9	437,0	466,8	492,2
Дициан	174,9	180,4	188,1	194,4	201,2	210,8	218,8	227,4	239,8	250,2
Диэтиламин	–	–	226,1	235,7	246,0	261,2	274,1	288,2	309,3	327,4
Диэтилацеталь	245,5	254,2	266,7	277,1	288,2	304,4	317,9	332,7	354,4	372,9
Диэтилдиоксису кцинат	337,5	349,0	365,6	379,3	394,0	415,2	432,9	452,1	480,4	50Ф,2
Диэтилдифторсилан	212,9	220,7	231,9	241,2	251,2	265,8	278,1	291,5	311,4	328,4
Диэтилдихлорсилан			276,1	287,9	300,7	319,4	335,3	352,8	379,0	401,5
Диэтиленгликоль	360,3	371,7	387,9	401,1	415,3	435,6	452,4	470,5	496,8	518,7
Диэтиленгликоль, бутиловый эфир	334,6	345,9	362,1	375,4	389,7	410,4	427,5	446,2	473,5	496,5

Продолжение табл. 12.11

	Давление пара, кПа									
	0.1	0.2	0,5	.	2	5	10	20	50	100
Диэтиленгликоль, этиловый эфир	313,2	324,2	340,1	353,1	367,3	387,7	404.8	423,5	450,9	474,2
Диэтилен г л ико ль-бис-Алорацетат	417,3	429,8	447,4	461,8	477,1	499,0	516,9	536,2	564,0	587,0
Диэтилизосукцинат	307,2	318,3	334,4	347,6	361,9	382 8	400,3	419,4	447,7	471,8
Диэтилкарбонат	258,2	267,5	280,9	292,0	304,0	321^5	336,1	352,1	375,7	395,8
Диэтилмалат	347,7	359,9	377,4	391,7	407,3	429,8	448,6	469 0	499,2	524,6
Диэтилшлеинат	324,6	336,2	353,0	366,8	381,8	403,6	421,8	44 I>	471,1	496,0
Диэтилмалонат	308,4	319,5	335,4	348,6	362,8	383,5	400,8	419,7	**447,7**	471,4
Диэтиловый эфир	195,3	202,7	213,3	222,0	231,5	245,4	257,1	270,0	**289,1**	305,4
Диэтилоксалат	315,2	325,3	339,7	351,4	364,1	382,2	397,2	413,3	436,9	456,5
Диэтилселенид	242,9	252,0	265,0	275,8	287,5	304,6	319,0	334,7	358,2	378,1
Диэтилсукцинат	322,5	333,8	350,1	363,6	378,1	399,1	416,7	435,8	464,0	487,9
Диэтилсульфат	314,3	325,6	341,7	355,1	369,5	390,4	407,9	427,0	455,3	479,2
Диэтилсульфид	229,7	238,4	250,8	261,1	272,3	288,6	302,3	317,4	339,9	359,0
Диэтилсульфит	277,4	287,6	302,3	314,4	327,6	346,8	362,9	380,5	406,7	429,0
Диэтил-й-тартат	369,2	381,9	400,0	414,9	430,9	454,1	473,4	494,4	525,2	551,1
Диэтил-^/-тартат	367,4	380,2	398,4	413,4	429,6	453,0	472,6	493,8	525,0	551,4
Диэтилфумарат	320,7	332,2	348,7	362,4	377,1	398,6	416,5	436,2	465,1	489,7
Диэтилцинк	245,9	255,3	268,9	280,2	292,5	310,6	325,7	342,5	367,4	388,9
Диэтоксидиметилсилан	249,0	258,1	271,2	281,9	293,6	310,6	324,9	340,4	363,5	383,2
1,3-Диэтокситетраметилсилоксан	282,8	292,9	307,3	319,3	332,2	351,0	366,6	383,8	409,0	430,5
1,2-Диэтоксиэтан	234,7	244,4	258,5	270,3	283,2	302,3	318,5	336,6	363,9	387,7
Изоамилацетат	267,9	277,7	291,7	303,4	316,0	334,4	349,7	366,6	391,6	412,8
Изоамилнитрат	272,9	282,7	296,9	308,5	321,2	339,6	354,9	371,7	396,6	417,7
Изоамиловый спирт	278,5	287,2	299,7	309,9	320,7	336,4	349,2	363,1	383,2	**400,0**
Изоамилформиат	251,1	260,6	274,4	285,8	298,1	316,2	331,5	348,2	373,2	**394,6**
Изобутиламин	218,8	226,9	238,6	248,2	258,7	273,9	286,7	300,8	321,6	339,3
Изобутилацетат	247,3	256,7	270,2	281,5	293,7	311,5	326,5	343,1	367,7	388,8
Изобутилбутират	273,1	283,4	298,3	310,6	324,0	343,6	360,0	378,1	405,1	428,1
Изобутилдихлорацетат	295,8	306,6	322,1	334,8	348,7	368,8	385,7	404,2	431,5	454,7
Изобутилизобутират	272,3	282,2	296,4	308,1	320,8	339,3	354,7	371,7	396,7	418,0
Изобутилкарбамат	–	335,8	351,2	363,8	377,4	397,1	413,3	431,0	456,7	478,4
Изобутиловый спирт	260,0	268,5	280,6	290,5	301,1	316,3	328,9	342,6	362,5	379,2
Изобутилпропионат	266,0	275,6	289,5	300,8	313,2	331,1	346,1	362,5	386,8	407,4
Изобутилформиат	236,3	245,1	257,9	268,4	279,9	296,7	310,7	326,2	349,2	368,8
Изобутилхлорид	215,3	223,5	235,3	245,1	255,7	271,3	284,4	298,9	320,4	338,8
Изовалериановая кислота	302,9	313,0	327,4	339,2	352,0	370,3	385,5	402,0	426,1	446,3
Изокапролактон	305,7	317,2	333,7	347,4	362,3	384,0	402,3	422,4	452,2	**477,7**
Изокапроновая кислота	327,8	338,0	352,6	364,5	377,2	395,4	410,4	426,6	450,1	
Изомасляная кислота	283,7	293,6	307,6	319,2	331,7	349,8	364,8	381,2	405,3	425'6
Изопрен	189,9	197,3	207.9	216,8	226,5	240,7	252,7	266,0	285,8	302,9
Изопропилацетат	230,7	239,3	251,7	262,0	273,2	289,5	303,1	318,2	340,5	359,5
Изопропилизобутират	252,0	261,3	274,7	285,7	297,7	315,2	329,9	346,0	369,9	390,2
Изопропиллевулинат	315,1	326,2	342,2	355,4	369,7	390,4	407,6	426,5	454,3	477,8
Изопропилформиат	217,2	225,4	237,1	246,8	257,4	272,8	285,7	300,0	321,1	339,2
Изопропилхлорацетат	272,3	282,3	296,7	308,6	321,5	340,4	356,1	373,5	399,1	421,0
Иодбензол	291,1	302,2	318,2	331,4	345,8	366,9	384,6	404,2	433,3	458,2
1-Иод-3-метилбутан	265,4	275,5	290,1	302,2	315,3	334,6	350,7	368,6	395,1	417,9
1-Иод-2-метилпропан	251,7	261,1	274,6	285,7	297,9	315,5	330,4	346,7	370,9	391,5
1-Иодоктан	312,3	324,4	341,9	356,4	372,2	395,4	414,9	436,5		496,4
1-Иодпропан	233,0	242,1	255,3	266,3	278,2	295,8	310,6	327,0	351^6	372,8
2-Иодпропан	225,5	234,3	246,9	257,5	269,0	285,8	300,1	315,8	339,3	359,5
2-Иодтолуол	304,6	316,2	333,1	347,1	362,3	384,6	403,4	424,1	454,9	481,4
Каприловая кислота	355,5	366,2	381,4	393,7	406,8	425,6	441,1	457,6	481,6	501,4
Каприловый альдегид	342,9	350,7	361,6	370,3	379,4	392,1	402,4	413,2	428,3	440,6
Каприлонитрил	308,4	319,5	335,5	348,7	362,9	383,7	401,0	420,0	448,1	471,9
Капронитрил	276,9	287,4	302,5	315,0	328,6	348,5	365,2	383,7	411,1	434,6
Капроновая кислота	152,8	159,1	168,2	175,8	184,1	196,4	206,9	218,5	236,0	251,2
КарбопилСеленид	305,8	316,4	331,7	344,3	357,9	377,6	394,0	411,9	438,1	460,4
2-Крезол	318,0	328,6	343,9	356,4	369,9	389,3	405,4	422,9	448,5	470,1
3-Крезол	319,3	329,9	345,1	357,6	370,9	390,2	406,2	423,6	448,9	470,2

Продолжение табл. 12.12

Вещество	0,1	0.2	0.5		2	5	10	20	50	100
4-Крезол	—	—	335,4	347,5	360,6	379,3	394,9	411,7	436,4	457,1
а-Кротоновая кислота	301,4	311,4	325,6	337,3	349,9	367,9	382,9	399,1	422,8	442,7
р-Кротоновая кислота	238,8	248,0	261,4	272,5	284,5	302,2	317,2	333,7	358,3	379,4
Чыс-Кротононитрил	248,7	258,2	272,0	283,4	295,8	314,0	329,3	346,2	371,3	393,0
транс-Кротононитрил	323,5	334,9	351,3	364,8	379,4	400,5	418,2	437,5	465,9	490,0
2,3-Ксиленол	319,1	330,1	345,9	358,9	372,9	393,2	410,1	428,5	455,5	478,2
2,4-Ксиленол	333,7	345,0	361,3	374,7	389,0	409,8	427,1	445,9	473,5	496,7
3,5-Ксиленол	329,7	340,9	357,0	370,2	384,4	404,9	422,0	440,6	467,8	490,7
2,4-Ксилидин	319,9	331,0	347,1	360,2	374,5	395,1	412,3	431,1	458,6	482,0
2,6-Ксилидин	311,4	323,1	340,0	354,0	369,1	391,3	410,0	430,5	460,9	487,0
2-Ксилол	263,9	273.9	288,2	300,1	313,1	332,0	347,9	365,4	391,4	413,7
3-Ксилол	260,9	270,7	284,9	296,6	309,3	327,9	343,6	360,8	386,3	408,2
4-Ксилол	259,7	269,5	283,7	295,4	308,2	326,8	342,5	359,7	385,4	407,4
Левулиновая кислота	370,0	380,9	396,3	408,8	422,1	441,2	456,7	473,4	497,5	517,4
Левулиновый альдегид	295,8	306,7	322,4	335,4	349,5	370,1	387,4	406,3	434,4	458,4
Масляная кислота	293,6	303,5	317,7	329,3	341,8	359,8	374,8	391,1	414,9	435,0
Мезитила окись	259,3	268,8	282,5	293,8	306,1	324,0	339,0	355,5	379,8	400,6
Меркаптоуксусная кислота	328,2	339.4	355,3	368,4	382,5	402,9	419,8			
Метакрилнитрил	224,4	233,2	246,0	256,7	268,3	285,5	299,9	315,9	339,9	360,7
Метакриловая кислота	293,1	302,9	316,9	328,3	340,7	358,5	373,2	389,2	412,6	432,3
Метан	66,2	69,0	73,1	76,5	80,3	85,9	90,7	96,0	104,1	111,2
Метанол	225,6	233,3	244,4	253,5	263,2	277,4	289,2	302,0	320,7	336,5
Метилакрилат	225,5	233,9	245,9	255,9	266,7	282,4	295,6	310,1	331,6	350,0
Метиламин	174,6	180,8	189,7	197,1	205,0	216,6	226,2	236,8	252,2	265,4
Л?-Метиланилин	303,5	314,5	330,3	343,4	357,5	378,1	395,3	414,1	441,9	465,6
Метилантранилат	344,1	356,9	375,5	390,8	407,5	431,8	452,2	474,7	508,0	536,5
Метилацетат	212,0	219,9	231,1	240,4	250,5	265,2	277,6	291,1	311,2	328,3
Метилацетилен	158,8	164,7	173,3	180,4	188,1	199,4	208,8	219,2	234,7	247,9
и-Метилбензиловый спирт	316,5	327,4	343,0	355,9	369,7	389,7	406,4	424,5	451,2	473,6
Метилбензоат	305,3	316,3	332,2	345,2	359,4	380,0	397,2	416,1	443,9	467,6
2-Метилбензотиазол	338,0	349,2	365,2	378,3	392,4	412,7	429,5	447,8	474,5	496,9
Метилбромид	173,4	180,1	189,7	197,7	206,4	219,2	230,0	241,8	259,6	274,8
2-Метилбутан	186,9	194,1	204,6	213,3	222,8	236,8	248,5	261,5	280,9	297,6
3-Метил-2-бутанон	249,0	257,0	268,3	277,6	287,5	301,8	313,5	326,2	344,7	360,2
2-Метил-1-бутен	180,0	187,2	197,6	206,3	215,8	229,8	241,6	254,8	274,5	291,6
2-Метил-2-бутен	194,5	202,0	213,0	222,0	231,9	246,4	258,6	272,1	292,2	309,6
Метилбутират	242,2	251,0	263,7	274,1	285,5	301,9	315,7	330,8	353,2	372,2
2-Метилгексан	228,5	237,2	249,8	260,2	271,6	288,2	302,2	317,6	340,6	360,3
3-Метилгексан	229,3	238,0	250,6	261,0	272,4	289,0	303,0	318,4	341,3	360,9
2-Метилгептан	246,8	256,2	269,6	280,7	292,8	310,5	325,4	341,7	366,1	386,9
3-Метилгептан	248,3	257,5	270,9	282,0	294,1	311,7	326,5	342,7	366,8	387,5
4-Метилгептан	247,3	256,6	270,0	281,1	293,2	310,8	325,7	342,0	366,2	387,0
2-Метил-2-гептен	252,2	261,6	275,1	286,4	298,6	316,4	331,3	347,7	372,1	392,9
6-Метил-3-гептен-2-ол	309,5	319,3	333,3	344,8	357,0	374,6		404,8	427,6	446,6
6-Метил-5-гептен-2-ол	310,4	320,2	334,2	345,6	357,8	375,4	389^9	405,5	428,2	447,1
Метилгликолат	277,8	287,7	301,9	313,6	326,2	344,6	359,9	376,6	401,3	422,2
а-Метилглутаровый ангидрид	360,4	373,5	392,2	407,7	424,5	449,0	469,4	491,8	524,9	553,0
2-Метилдисилазая	193,0	200,3	211,0	219,9	229,5	243,6	255,5	268,6	288 1	304,8
Метилдихлорацетат	271,0	280,7	294,7	306,2	318,7	336,8	351,9	368,5	***392,9***	413,7
Метилдихлорсилан	–	–	211,7	221,2	231,7	247,3	260,4	275,1	297,2	316,5
Метилизобутират	234,9	243,5	255,9	266,1	277,2	293,4	307,0	321,8	343,9	362,6
Метилизовалерат	249,2	258,4	271,7	282,7	294,7	312,1	326,7	342,7	366,4	386,7
Метилизотиоцианат	236,3	246,3	260,8	273,0	286,4	306,2	323,2	342,1	370,8	395,9
Метилиодид	–	203,1	214,3	223,6	233,7	248,6	261,2	275,2	296,1	314,2
Метилкапронат	273,8	293,8	298,2	310,2	323,1	341,9	357,6	374,9	400,5	422,3
Метиллевулинат	307,4	318,4	334,2	347,2	361,3	381,8	398,9	417,6	445,2	468,6
Метилмеркаптан	179,2	185,8	195,3	203,2	211,8	224,2	234,7	246,1	263,2	277,7
Метилметакрилат	237,4	246,3	259,3	270,0	281,6	298,6	312,9	328,6	352,0	372,0
2-Метилпентан	208,6	216,5	228,1	237,7	248,2	263,5	276,4	290,6	311,8	330,0
3-Метилпентан	210,0	218,0	229,7	239,5	250,0	265,6	278,6	293,1	314,6	333,1
2-Метил-1-пентанол	283,4	292,9	306,5	317,7	329,6	346,9	361,3	376,9	399,6	418,8

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0.2	0,5	1	2	Б	10	2Г	50	100
2-Метил-2-пентанол	264,1	273,0	285,7	296,2	307,4	323,6	337,0	351,6	373,0	391,0
2-Метил-4-пентанол	268,2	277,5	290,8	301,8	313,6	330,8	345,0	360,6	383,4	402,7
4-Метил-2-пентанон	267,6	276,3	288,7	298,8	309,7	325,4	338,3	352,3	372,7	
2-Метил пропан	160,7	167,1	176,3	184,1	192,5	204,8	215,3	226,9	244,3	259 U
2-Метилпропен	162,9	169,4	179,0	187,0	195,7	208,6	219,6	231,7	250,0	265,9
Метилпропиловый эфир	197,4	204,8	215,6	224,6	234,3	248,5	260,5	273,6	293,2	310,0
Метилпропионат	227,1	235,4	247,4	257,3	268,0	283,6	296,7	311,1	332,3	350,4
2-Метилпропионил-бромид	281,1	291,5	306,3	318,6	331,9	351,3	367,6	385,4	411,9	434,4
Метилсалицилат	320,5	332,1	348,7	362,5	377,4	399,0	417,1	437,0	466,3	491,2
Метилсилан	131,8	137,0	144,7	151,1	158,1	168,4	177,1	186,7	201,3	213,8
2-Метилтиофен	241,0	250,3	263,7	274,9	287,0	304,9	319,9	336,5	361,3	382,6
г,3-Метилтиофен	244,0	253,3	266,7	277,8	290,0	307,7	322,6	339,1	363,6	384,7
Метилтиоцианат	254,0	263,0	278,0	289,8	302,6	321,5	337,3	354,9	381,0	403,5
Метилтрихлорсилан			231,0	241,0	251,8	267,7	281,2	296,1	318,3	337,5
Летилуретан	294,5	304,6	319,2	331,2	344,2	362,9	378,5	395,5	420,5	441,5
Метил формиат	195,2	202,5	212,9	221,5	230,8	244,5	255,9	268,4	287,0	302,9
Метилфторид	122,9	127,5	134,1	139,7	145,7	154,4	161,8	169,9	182,0	192,3
Метилхлорацетат	265,0	274,3	287,5	298,4	310,2	327,3	341,5	357,0	379,7	399,0
Метилхлорид	159,8	165,5	173,8	180,6	188,0	198,7	207,7	217,5	232,0	244,3
Метилциклогексан	233,0	242,0	255,0	265,8	277,6	294,9	309,5	325,5	349,5	370,2
Мегалциклопентан	215,7	224,0	236,0	246,0	256,8	272,6	286,0	300,7	322,7	341,6
Метил циклопропан	173,4	180,0	189,7	197,7	206,4	219,2	230,0	241,9	259,7	275,0
2-Метил-3-этилпентан	244,1	253,4	266,9	278,1	290,3	308,1	323,2		364,4	385,7
3-Метил-3-этилпентан	244,1	253,5	267,1	278,5	290,8	308,9	324,2	341 !o	366,2	387,9
2-Метоксианилин	328,8	340,1	356,1	369,3	383,6	404,1	421,2	439,8	467,1	490,0
2-Метоксифенол	320,3	331,2	346,8	359,6	373,4	393,4	409,9	428,0	454,4	476,6
2-Метоксиэтанол	255,8	265,2	278,8	290,0	302,1	319,8	334,6	350,9	375,0	395,6
Метоуксусная кислота	320,4	331,3	346,9	359,7	373,5	393,5	410,1	428,1	454,5	476,7
Муравьиная кислота	242,8	251,3	263,4	273,5	284,3	300,0	313,0	327,3	348,3	366,0
2-Нитроанилин	371,0	383,8	402,3	417,4	433,8	457,6	477,2	498,7	530,3	557,0
3-Нт|зоанилин	386,0	399,3	418,4	434,1	451,0	475,4	495,8	517,9	550,4	577,9
4-Нироанилин	410,0	423,9	443,9	460,2	477,9	503,4	524,6	547,6	581,3	609,7
2-Нитробензальдегид	352,8	365,7	384,3	399,6	416,2	440,5	460,7	483,0	515,9	543,9
3-Нитробензальдегид	362,9	375,7	394,1	409,2	425,5	449,2	469,0	490,5	522,3	549,2
Нитробензол	310,8	322,1	338,5	352,0	366,6	388,0	405,8	425,4	454,4	479,1
Нитроглицерин	393,3	409,4	432,8	452,5	473,9	505,7				
4-Нитро-1,3-ксилол	332,2	344,4	361,9	376,5	392,2	415,1	434,3	455,4	486,6	513,2
Нитрометан	239,4	248,2	261,0	271,6	283,1	299,8	313,9	329,3	352,2	371,7
1-Нитропропан	258,3	267,9	281,8	293,2	305,7	323,9	339,2	356,0	380,9	402,2
2-Нитропропан	249,6	259,0	272,6	283,9	296,2	314,1	329,1	345,7	370,3	391,4
2-Нитротиофен	315,5	327,4	344,7	359,0	374,6	397,4	416,5	437,6		495,9
2-Нитротолуол	318,0	329,8	346,7	360,8	376,0		416,8	437,2	467^5	493,4
3-НИТРОТОЛУОЛ	318,2	330,4	348,1	362,8	378,7	402,'1	421,9	443,6	476,1	504,0
4Н р у	321,3	333,8	351,8	366,7	383,0	406,9	427,0	449,3	482,5	511,1
2Н рофе	368,2	379,6	395,8	409,0	423,1	443,4	460,0	478,0	503,9	525,5
2-Нитрофенол	316,5	328,0	344,5	358,1	372,8	394,2	412,1	431,7	460,7	485,4
Нитроэтан	247,4	256,6	269,8	280,8	292,7	310,1	324,7	340,8	364,6	384,9
4-Оксибензальдегид	387,5	400,9	420,0	435,8	452,7	477,3	497,7	519,9	552,5	580,1
ЯфкСибуИДОПИпрИЛ	309,9	320,0	334,3	346,1	358,6	376,7	391,7	407,9	431,5	451,2
«-Оксиизомасляная кис-	341,2	351,6	366,3	378,3	391,2	409,5	424,6	440,8	464,2	483,6
4 0 3 2 f га-	312,4	322,6	337,2	349,1	361,9	380,4	395,6	412,1	436,2	456,4
4-Окси-4-мстил-2-г1ента-	290,1	300,4	315,0	327,1	340,1	359,0	374,8	392,0	417,3	438,8
3-Оксипропионитрил	326 9	338,4	355,0	368,6	383,4	404,8	422,6	442,1	470,9	495,2
Октаметилтрисилоксан	275*3	285,2	299,5	311^2	323,9	342,4	357,9	374,8	399,8	421,0
Октаметилциклотетраси-локсан	289,7	300,1	315,0	327,2	340,5	359,8	375,9	393,5	419.4	441.5
Октан	253,5	262,9	276,5	287,8	300,0	317,9	332,9	349,3	373,7	394,6
ЬОктанол	320,1	330,4	345,0	356,9	369,6	388,0	403,1	419,5	443,3	463,1
2-Окганол	300,8	311,1	325,9	338,0	351,2	370,1	385,9	403,0	428,2	449,5
2-Октано11	290,9	301,3	316,3	328,7	342,1	361,6	377,8	395,6	421,9	444,3

Продолжение табл. 12.12

	Давление пара, кПа									
	0.1	0.2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Параформальдегид	259,3	268,6	281,9	292,8	304,6	321,8	336,1	351,8	374,9	394,6
1.3-Пентадиен	197,0	204,6	215,6	224,7	234,7	249,2	261,5	275,1	295,3	312,7
1.4-Пентадиен	186,3	193,5	204,0	212,7	222,1	236,0	247,7	260,7	280,0	296,6
Пентан	191,8	199,3	210,2	219,2	229,1	243,5	255,7	269,2	289,4	306,8
2-Пентанол	**270,3**	278,8	291,0	300,9	311,5	326,8	339,4	353,0	372,7	389,1
2-Пентанон	**256,9**	265,3	277,2	286,9	297,3	312,3	324,7	338,1	357,7	374,1
3-Пентанон	256,1	264,4	276,3	286,1	296,5	311,6	324,0	337,5	357,1	373,6
2, 3, 4-Пентатриол	424,0	436,9	455,3	470,3	486,3	509,2	528,0	548,2	577,5	601,8
Пентахлорбензол	365,8	378,4	396,4	411,3	427,2	450,4	469,6	490,6	521,4	547,3
Пентахлорфенол	—	—	–	441,8	458,4	482,5	502,5	524,1	555,9	582,5
Пентахлорэтан	268,8	279,4	294,7	307,5	321,4	341,9	359,2	378,3	407,0	431,7
Пентахлорэтилбензол	363,4	377,1	397,0	413,4	431,3	457,5	479,5	503,7	539,7	570,6
1-Пентен	188,7	196,0	206,6	215,4	225,0	239,1	251,0	264,1	283,7	300,6
2-Пиколин	257,9	267,4	281,2	292,6	304,9	322,9	338,0	354,6	379,2	400,3
Пимелиновая кислота	430,7	444,0	462,9	478,3	494,7	518,3	537,6	558,5	588,7	613,8
Пиперидин		248,0	261,2	272,1	284,0	301,5	316,2	332,4	356,5	377,2
Пиридин	248,9	258,1	271,3	282,2	294,1	311,3	325,8	341,7	365,2	385,3
Пировиноградный ангидрид	337,0	349,2	366,8	381,3	397,0	419,9	439,0	460,0	490,9	517,3
Пирогаллол		398,1	417,4	433,3	450,5	475,4	496,1	518,8	552,1	580,3
Пирокатехин		353,3	370,7	384,9	400,3	422,7	441,4	461,8	491,8	517,3
Пробковая кислота	439,3	452,4	470,9	486,0	502,1	525,1	543,9	564,1	593,2	617,3
Пропан	141,8	147,4	155,6	162,4	169,9	180,8	190,1	200,4	215,8	229,2
1.2-Пропандиол	313,8	324,1	338,9	351,0	363,9	382,6	398,1	414,9	439,4	459,9
1.3-Пропандиол	327,7	338,9	354,8	367,8	381,9	402,2	419,0	437,4	464,2	486,9
1-Пропанол	254,3		274,2	283,7	294,0	308,7	320,9	334,1	353,3	369,3
2-Пропанол	243,3	251,'2	262,5	271,7	281,6	295,8	307,5	320,3	338,8	354,3
Пропиламин	204,9	212,5	223,5	232,6	242,5	256,9	269,0	282,3	302,1	318,9
Пропилацетат	242,3	251,1	263,7	274,1	285,4	301,9	315,6	330,7	353,0	371,9
Пропилбутират	266,3	276,2	290,4	302,2	314,9	333,5	349,2	366,3	391,7	413,5
Пропилен	137,8	143,3	151,4	158,1	165,4	176,3	185,5	195,6	211,0	224,3
Пропилена окись	194,5	201,8	212,5	221,3	230,9	244,9	256,6	269,6	288,9	305,4
Пропилизовалерат	276,2	286,3	300,9	313,0	326,1	345,2	361,2	378,8	404,8	427,0
Пропилкарбамат	320,3	330,7	345,5	357,6	370,6	389,3	404,8	421,5	445,9	466,2
Пропиллевулинат	326,1	337,5	353,8	367,3	381,8	402,8	420,4	439,5	467,6	491,4
Пропилмеркаптан	213,0	221,3	233,2	243,1	253,9	269,7	283,0	297,7	319,7	338,6
Пропилпропионат	254,0	263,3	276,7	287,9	299,9	317,5	332,2	348,3	372,3	392,7
Пропил формиат	226,0	234,4	246,5	256,6	267,5	283,5	296,9	311,6	333,5	352,2
Пропилхлорглиоксилат	277,1	286,7	300,4	311,7	323,9	341,5	356,1	372,1	395,6	415,4
Пропионамид	333,5	344,3	359,8	372,5	386,1	405,7	421,9	439,4	465,0	486,4
Пропионитрил	233,4	242,3	255,2	265,9	277,5	294,4	308,7	324,5	347,9	368,1
Пропионовая кислота	273,5	283.1	296,8	308,2	320,4	338,1	352,9	369,0	392,7	412,7
Пропионовый ангидрид	288,5	298,7	313,4	325,6	338,7	357,7	373,6	391 [о	416,5	438,2
Резорцион	375,5	387,7	405,1	419,4	434,7	456,8	475,0	494,7	523,5	547,6
Салициловая кислота	377,2	387.9	403,0	415,2	428,2	446,7	461,7	477,9	501,0	520,0
Салициловый альдегид	300,5	311,7	327,8	341,2	355,7	376,8	394,6	414,1	443,0	467,8
Селенофен	228,9	238,6	252,6	264,4	277,3	296,5	312,9	331,2	358,9	383,2
Сероселенуглерод	221,4	230,1	242,8	253,3	264,7	281,6	295,8	311,6	335,2	355,6
Сероуглерод	196,3	204,1	215,4	224,9	235,2	250,3	263,2	277,4	298,8	317,2
Синильная кислота	198,2	204,9	214,4	222,2	230,7	242,8	252,9	263,9	280,0	293,5
Сукцинамид	380,6	393,1	411,0	425,7	441,4	464,1	482,9	503,2	532,9	557,8
Сукцинхлорид	306,9	317,7	333,2	346,0	359.7	379,7	396,4	414,6	441,4	464,0
Стирол	261,8	271,9	286,6	298,8	312,2	331,7	348,1	366,3	393,5	416,9
1, 1, 1, 2-Тетрабромэтан	326,0	336,4	351,3	363,4	376,4	395,1	410,5	427,2	451,5	471,7
1, 1,2, 2-Тетрабромэтан	332,5	344,7	362,4	376,9	392,7	415,7	435,0	456,2	487,6	514,3
Тетраметилбор	210,6	219,0	231,2	241,4	252,5	268,8	282,6	297,9	320,9	340,8
2, 2, 3, 3-Тетраметилбутан	251,1	259,7	272,1	282,3	293,3	309,2	322,4	336,8	357,9	375,8
Тетраметилолово	217,5	226,0	238,4	248,7	259,9	276,3	290,2	305,6	328,7	348,5
Тетраметилпиперазин	290,7	301,5	317,0	329,8	343,6	363,9	380,9	399,5	427,1	450,7
Тетраметилсвинец	239,1	248,3	261,7	272,8	285,0	302,7	317,7	334,3	359,1	380,3
Тетраметилсилан	185,5	192,8	203,3	212,1	221,7	235,8	247,7	260,9	280,7	297,7
Тетранитрометан			278,5	289,9	302,3	320,3	335,5	352,2	377,0	398,2
Тетрахлорамии	340,6	348,2	358,7	367,1	375,9	388,2	398,1	408.4	423,0	434,8
1, 2, 3, 4-Тетрахлорбензол	335,5	348,0	366,1	381,0	397,3	421,0	440,9	462,7	495,2	523,0

Продолжение табл. 12.12

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5		2	5	10	20	50	100
. ,2,3,5-Тетрахлорбензол	325,1	337,7	356,0	371,2	387,7	412,0	432,5	455,2	489,1	518,2
1,2,4,5-Тетрахлорбензол			—	—	394,1	417,5	437,1	458,7	490,8	518.2
1,1,2,2-Тетрахлор-1,2-дифторэтан	231,5	240,3	253,0	263.5	274,9	291,7	305,8	321,3	344,4	364,2
3,4,5,6-Тетрахлор-1,2-ксилол	361,2	373,8	391,9	406,8	422,9	446,2	465,6	486,7	517,9	544,2
Тетрахлорсилан		—	223,7	233,5	244,2	259,9	273,2	287,9	310,0	329,1
2-0., а, ос-Тетрахлортолуол	336,8	349,8	368,8	384,5	401,6	426,7	447,9	471,3	506,3	536,5
2,3,4,6-Тетрахлорфенол	367,1	379,6	397,5	412,2	428,0	450,9	469,9	490,6	520,8	546,4
1,1,1,2-Тетрахлорэтан	251,9	261,6	275,8	287,5	300,3	319,0	334,8	352,2	378,3	400,7
1,1,2,2-Тетрахлорэтан	264,0	274,0	288,6	300,7	313,9	333,2	349,4	367,3	393,9	416,8
1,2,3,5-Тетрахлор-4-этилбензол	344,7	357,8	376,6	392,3	409.3	434.2	455,2	478,3	512,6	542,1
Тетрахлорэтилен	248,0	257,5	271,1	282,5	294,8	312,9	328,1	344,9	369,9	391,3
Тетраэтилдистибин	363,4	377,9	399,1	416,8	436,1	464,5	488,6	515,3	555,5	590,3
Тираэтиленгликоль	421,8	433,7	450,5	464,1	478,5	499,0	515,7	533,6	559,3	580,4
Тетраэтиленгликольхлоргидрин	378,1	390,5	408,3	422,8	438,4	460,9	479,6	499,8	529,2	553,9
Тетраэтилсвинец	305,8	316,1	330,8	342,9	355,9	374,7	390,3	407,3	432,1	453,0
Тетраэтилсилан	266,8	277,1	292,0	304,4	317,8	337,6	354,2	372,6	400,0	423,6
Тираэтоксисилан	282,8	293,2	308,2	320,7	334,1	353,8	370,3	388,4	415.2	438,1
Тиглиновый альдегид	243,9	253,3	267,0	278,4	290,7	308,9	324,2	341,1	366,4	388,1
2,2-Тиодиэтанол	305,9	326,8	359,1	388,2	422,5	478.2	531,2	—	—	
Тиофен	227,4	235,9	248,0	258,1	269,1	285,0	298,4	313,2	335,0	353,7
4-Толилгидразин	292,6	303,4	319,0	331,9	345,9	366,3	383,4	402,2	430,1	453,9
2-Толилизоцианид	310,5	321,3	336,9	349,7	363,5	383,6	400,3	418,5	445,3	468,0
2-Толуидин	308,7	320,0	336,2	349,6	364,1	385,2	402,9	422,2	450,9	475,3
3-Толуидин	309,5	320,5	336,3	349,4	363,4	383,9	401,0	419,6	447,1	470,5
4-Толуидин	304,2	315,6	332,1	345,7	360,6	382,2	400,4	420,5	450,2	475,7
4-Толунитрил	309,4	321,2	338,2	352,4	367,8	390,3	409,2	430,1	461,3	488,0
Толуач	241,5	250,6	263,9	274,9	286,9	304,4	319,1	335,3	359,5	380,2
Толуол-2,4-диамин	373,4	385,9	403,7	418,4	434,2	457,0	475,8	496,3	526,3	551,5
Трибромацетальдегид	286,7	297,4	312,7	323,4	339,2	359,3	376,2	394,7	422,2	445,7
1,1,2-Трибромбутан	312,3	324,0	340,8	354,8	370,0	392,2	410,8	431,3	461,7	487,7
1,2,2-Трибромбутан	308,2	319,8	336,7	350,6	365,8	388,0	406,6	427,1	457,7	483,9
2,2,3-Трибромбутан	305,6	317,0	333,5	347,2	362,0	383,7	401,8	421,8	451,5	476,9
Трибромметан		274,4	289,3	301,8	315,3	335,2	352,0	370,6	398,4	422,3
1,2,3-Трибромпропан	314,2	326,0	343,0	357,0	372,3	394,7	413,4	434,1	464,8	491,0
1,1,2-Трибромэтан	299,3	310,1	325,7	338,5	352,4	372,6	389,5	408,0	435,3	458,5
Тригексиламин	172,5	179,1	188,8	196,8	205,5	218,3	229,1	241,0	258,7	274,0
Триметилбор	153,7	160,0	169,2	176,9	185,3	197,7	208,2	220,0	237,7	253,1
2,2,3-Триметилбутан			238,4	248,9	260,4	277,3	291,7	307,6	331,4	352,1
Триметилаллий	208,1	216,0	227,6	237,1	247,5	262,7	275,6	289,7	310,8	328,9
Триметилдиборан	196,1	203,9	215,3	224,8	235,2	250,4	263,3	277,7	299,2	317,8
2,2-3-Триметилпентан	239,0	248,2	261,6	272,7	284,7	302,4	317,3	333,8	358,4	379,5
2,2,4-Триметилпентан	232,0	241,0	253,9	264,7	276,5	293,7	308,2	324,3	348,2	368,8
2,3,4-Триметилпентан	241,9	251,2	264,6	275,7	287,9	305,7	320,6	337,2	361,8	383,0
2,2,4-Триметил-2-пентан011	283,0	291,9	304,5	314,9	325,9	341,8	354,8	368,9	389,4	406,4
Триметилпропилолово	255,1	264,7	278,7	290,2	302,8	321,1	336,6	353,6	378,9	400,6
Триметилпропилсилан	222,7	231,6	244,5	255,2	266,9	284,2	298,8	315,0	339,3	360.3
Триметилфосфат	294,0	305,2	321,4	334,9	349,6	371,0	389,1	409,0	438,6	464,1
Триметилхлорсилан			223,7	233,5	244,2	260,0	273,3	288,1	310,3	32P,5
Триметилянтарный ангидрид	320,2	332,3	349,7	364,1	379,8	402,7	422,0	443,2	474.7	501,7
0,0, а-Трифтортолуол	236,5	245,5	258,4	269,2	280,9	298,1	312,5	328,4	352,1	372,5
Трифторфенилсилан	237,6	246,4	259,1	*269,6*	280,9	297,5	311,4	326,6	349,3	368,6
2,4,6-Трихлоранилин	401,9	412,2	426,5	438,1	450,3	467,5	481,4	496,1	517,1	534,1
Трихлорацетальдегид	231,2	240,1	253,1	263,9	275,7	292,9	307,4	323,5	347,5	368,1
Трихлорацетилбромид	260,5	270,5	285,1	297,1	310,2	329,4	345,6	363,5	390,1	413,1
1,2, 3-Трихлорбензол	308,2	320,2	337,5	351,9	367,6	390,6	410,0	431,5	463,6	491,2
1,2,4-Трихлорбензол	305,6	317,4	334,3	348,4	363,8	386,2	405,1	426,0	457,2	483,9
1,3, Ь-Трихлорбензол		313,4	330,3	344,3	359,6	382,0	400,9	421,8	453,0	479,8
1,2,3-Трихлорбутан	268,0	278,9	294,7	308,0	322,5	343,8	362,0	382,2	412,6	439,0

Продолжение табл. 12.12

Вещество	давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5		2	5	10	20	50	100
Трихлоризопропилсилан	244,1	253,6	267,2	278,5	290,9	309,0	324,2	341,0	366,2	387,8
Трихлорметан	210,9	218,9	230,4	240,0	250,4	265,5	278,3	292,3	313,2	331,1
Трихлорметилсилан	208,8	217,1	229,1	239,1	250,0	266,0	279.6	294,7	317,2	336,7
1,1,1 -Трихлорпропан	239,8	248,9	262,1	273,1	285,0	302,4	317,1	333,3	357,4	378,0
1,2,3-Трихлорпропан	276,8	287,0	301,7	313,9	327,1	346,4	362,6	380,3	406,7	429,1
Трихлорсилан			206,9	215,9	225,7	240,1	252,3	265,8	286,0	303,5
а, а, а-трихлортолуол	312,6	324,1	340,7	354,5	369,4	391,2	409,4	429,4	459,1	484,4
1,1,2-Трихлор-1,2,2-трифторэтан	201.3	209,0	220,2	229,4	239,5	254,3	266,7	280,4	300,9	318,4
Трихлоруксусная кислота	318,7	329,2	344,1	356,3	369,5	388,4	404,0	421,0	445,7	466,4
Трихлоруксусный ангидрид	324,0	335,7	352,4	366,1	381,0	402,7	420.8	440,6	469,9	494,7
Трихлорфенилсилан	300,3	311,6	328,0	341,5	356,2	377,7	395,8	415,7	445,4	470,7
2,4,5-Трихлорфенол	340,0	352,2	369,7	384,2	399,9	422,6	441,6	462,5	493,2	519,3
2,4,6-Трихлорфенол	185,0	192,2	202,5	211,1	220,5	234,3	245,9	258,7	277,8	294,2
Трихлорфторметан	216,7	225.0	237,1	247,2	258,2	274,2	287,8	302,7	325,0	344,2
1,1,1-Трихлорэтан	243,9	253.1	266,6	277,7	289,8	307,5	322,4	338,9	363,4	384,4
1,1,2-Трихлорэтан	225,5	234,1	246,6	257,0	268,3	284,9	298,9	314,3	337,2	357,0
Трихлорэтилен	240,8	249,6	262,1	272,5	283,8	300,2	313,9	328,9	351,1	369,9
Трихлорэтилсилан	236,3	245,3	258,3	269,1	280,8	298,0	312,4	328,4	352,1	372,4
Трихлорэтоксисилан		–	113,0	120,3	128,7	141.8	153,5	167,5	190,2	212,0
Триэтиленбор	382,0	394,2	411,4	425,5	440,5	462,2	480,0	499,3	527,3	550,6
Триэтиленгликоль	249 [8	259,4	273,4	285,1	297,7	316,3	332,0	349,3	375,2	397,4
Триэтилметилсилан	275,9	287,5	304,4	318,6	334,2	357,3	377,0	398,9	432,3	461,5
Триэтилформиат	273,3	283,1	297,2	308,8	321,3	339,6	354,8	371,5	396,1	417,0
Триэтилфосфат	306,7	318,3	335,2	349,3	364,5	386,9	405,6	426,4	457,2	483,7
Триэтоксиэтилсилан	338,0	349,6	366,1	379,7	394,3	415,5	433,1	452,3	480,4	504,0
Углерода диоксид	135,8	140,1	146,1	151,0	156,3	163,8	170,0	176,7	186,4	194,5
Углерода недиоксид	173,9	180,7	190,6	198,8	207,7	220,9	232,0	244,3	262,7	278,6
Углерода оксид	49,9	51,8	54,7	57,1	59,7	63,5	66,8	70,4	75,7	80,4
Углерода сероокоид	138,0	143,4	151,2	157,7	164,8	175,2	184,0	193,7	208,3	220,8
Углерод подсернистый	282,4	293,2	308.9	322,0	336,2	357,0	374,5	393,9	–	–
Углерод четырехбромистый	–	-	-	–	345,3	366,8	384,8	404,7	434,5	460,0
Углерод четырехфторис-	88,3	91,9	97,3	101,7	106,7	113,9	120,1	127,0	137,4	146,6
Углерод четыреххлорис-	218,8	227,3	239,5	249,6	260,6	276,8	290,4	305,4	327,8	347,1
Уксусная кислота	252,0	261,2	274,6	285,7	297,7	315,2	329,8	345,9	369,8	390,1
Уксусный ангидрид	270,1	279,6	293,3	304,7	316,9	334,6	349,4	365,6	389,4	409,6
Уретан		318,8	333,6	345,7	358,7	377,5	393,1	410,1	434,9	455,7
2-Фенетидин	334,2	345,7	362,1	375,7	390,3	411,4	429.0	448,2	476,3	500,0
Фенетиловый спирт	325,7	337,1	353,4	366,9	381,4	402,5	420,0	439,1	467,3	491,1
Фенетол	285,7	296,3	311,5	324,1	337,8	357,8	374,5	392,9	420,1	443,3
Фенилацетат	305,8	316,7	332,5	345,5	359,6	380,0	397,1	415,8	443,3	466,8
Фенилацетохлорид	315,5	326,7	342,9	356,2	370,6	391,6	409,0	428,1	456,3	480,2
Фенилацетонитрил	327,3	339,2	356,4	370,5	385,9	408,3	427,0	447,6	478,0	503,9
Фенилгидразин	339,3	351,2	368,4	382,6	397,9	420,1	438,6	458,8	488,5	513,7
1,3-Фенилдиамин	366,6	379,6	398,2	413,6	430,1	454,2	474,3	496,2	528,5	555,9
Фенилдихлорфосфат	333,4	345,4	362,6	376,8	392,2	414,6	433,3	453,8	484,0	509,7
Фенилизотиоцианат	315,1	326,9	343,8	357,8	373,0	395,2	413,8	434,3	464,7	490,7
Фенилизоцианат	278,0	288,5	303,6	316,2	329,8	349,7	366,5	384,9	412,3	435,7
Фенилизоцианид	279,8	290,1	305,1	317,5	331,0	350,6	367,1	385,2	412,1	435,0
Фенилмеркаптан	286,1	296,4	311,3	323,6	337,0	356,3	372,6	390,3	416,5	438,9
Фенилтрихлорсилан			327,7	341,4	356,2	377,8	396,0	416,1	446,0	471,6
Фенилуксусная кислота	364^5	376,6	394,0	408,2	423,4	445,5	463,7	483,5	512,5	536,8
2-Феноксиэтанол	345,2	357,1	374,0	387,9	402,9	424,6	442,6	462,2	491,0	515,2
Фенол	306,0	316,1	330,6	342,4	355,1	373,5	388,7	405,2	429,2	449,4
Формальдегид			174,7	182,1	190,1	201,9	211,8	222,8	239,1	253,2
формамид	339,1	349,6	364,5	376,7	389,7	408,4	423,8	440,3	464,3	484,3
Фосген	176,'8	183,6	193,3	201,4	210,2	223,0	233,8	245,8	263,5	278,8
Фталевый ангидрид	357,1	370,2	389,0	404,6	421,5	446,2	466,8	489,4	523,0	551,5
Фталид	361,7	375,0	394,3	410,2	427,5	452,7	473,8	497,0	531,4	560,7

Н ^ .	Вещество	0,1	0,2	0,5		2	i	10	20	50	100
	Фталилхлорид	353,2	366,2	384,9	400,4	417,3	441,8	462,3	484,9	518,3	546,8
К	Фторбензол	225,6	234,2	246,6	256,8	268,0	284,3	298,0	313,2	335,7	355,0
К ;	2-Фтортолуол	243,9	253,2	266,6	277,7	289,8	307,4	322,3	338,7	363.1	384,0
	3-Фтортолуол	246,0	255,3	268',7	279,9	292,0	309,7	324,6	341,0	36.5,3	386,2
HF'	4-Фтортолуол	246,7	256,0	269,4	280,6	292,7	310,5	325,4	341,8	366,2	387,2
	1-Фторэтилен	120,8	125,8	133 !o	139,1	145,7	155,5	163,9	173,2	187,2	199,4
№	транс-Фумарилхлорид	282,7	292,8	307,4	319,5	332,6	351,5	367,4	384,8	4iO,4	432,2
Иг	Фурфуриловый спирт	300,5	310,5	324,8	336,5	349,1	367,2	382,2	398,5	422,3	442,3
К	Фурфурол	286,0	296,1	310,6	322,5	335,4	354,1	369,7	386,7	411,8	433,0
Цг	Хлоральгидрат	260,0	268,0	279,2	288,3	298,0	312,0	323,4	335,8	353,6	368,3
	2-Хлоранилин	312,2	323,4	339,5	352,8	367,2	388,2	405,6	424,8	453,0	477,0
К	4-Хлоранилин	326,1	338,0	355,0	369,1	384,4	406,6	425,2	445,6	475,7	501,3
^	Хлорбензол	254,9	264,7	278,7	290,4	303,1	321,7	337,3	354,5	380,2	402,3
Щ	1-Хлорбутан	219,6	228,1	240,4	250,6	261,7	278,0	291,8	306,9	329,6	349,1
К	Хлордиметилфенилсилан	296,7	307,8	323,9	337,2	S51.7	372,8	390,6	410,1	439,2	464,1
Ш	Хлордифторметан	147,5	153,0	161,0	167,6	174,7	185,2	194,0	203,6	217,9	230,2
	й-Хлоркротоновая кислота	338,3	348,8	363,7	375,9	•388,9	407,5	422,8	439,3	463,2	483,1
Г'	Хлерметилсилан	174,2	181,0	191,0	199,2	208,2	221,5	232,7	245,0	263,6	279,6
Ц	Хлорпикрин	243,1	252,3	265,6	276,7	288,7	306,3	321,1	337,4	361,6	382,4
р	2-Хлоршридин	280,4	291,1	306,4	319,2	333,0	353,3	370,4	389,1	417,1 •	441,1
И	1-Хлорпропан	200,8	208,4	219,5	228,7	238,7	253,3	265,6	279,2	299,4	316,7
J	2-Хлорпропан	190,5	198,0	208,9	218,0	227,8	242,4	254,7	268,3	288,7	306,4
'	1-Хлорпропилен	187,6	195,3	206,3	215,6	225,7	240,6	253,3	267,4	288,6	307,0
	3-Хлорпрошлен	198,8	206,5	217,5	226,7	236,7	251,4	263,7	277,4	297,7	315,2
	f-Хлорпропилтрихлор-силан	~	_	315,4	328,4	342,6	363,4	380,9	400,1	428,7	453,3
f	**3-Хлорстирол**	292,3	303,4	319,5	332,8	347,3	368,6	386,5	406,2	435,5	460,7
^	4-Хлорстирол	295,1	306,1	322,0	335,3	349,6	370,5	388,1	407,5	436,2	460,8
–	а-Хлортолуол	289,8	300,6	316,0	328,8	342,6	362,8	379,8	398,4	426,0	449,6
	2-Хлортолуол	272,9	283,3	298,3	310,8	324,4	344,2	360,9	379,4	406,8	430,4
	3-Хлортолуол	272,8	283,3	298,6	311,2	325,0	345,3	362,3	381,2	409,3	433,5
	4-Хлортолуол	273,7	284,2	299,5	312,1	325,8	346,0	362,9	381,6	409,5	433,5
	Хлортриметилсилан	206,3	214,3	225,8	235,4	245,9	261,3	274,2	288,6	310,0	328,4
	Хлортрифторметан	121,0	125,5	132,1	137,5	143,4	152,1	159,4	167,4	179,3	189,4
	2-Хлор-cl, а, а-трифторто-луол	267,7	277,9	292,7	305,0	318,4	338,0	354,5	372,7	399,9	423,2
	1-Хлор-1,2,2-трифторэти-лен	153,7	159,5	168,0	175,1	182,8	194,0	203,4	213,9	229,4	242,7
	Хлортриэтилсилан	263,3	273,4	288,0	300,1	313,3	332,6	348,9	366,8	393,6	416,6
	Хлоруксусная кислота	311,0	321,5	336,5	348,8	362,1	381,2	397,1	414,4	439,6	460,9
	Хлоруксусный ангидрид	335,9	346,9	362,5	375,3	389,1	408,9	425,3	443,1	468,9	490.6
	4-Хлорфенетиловый спирт	351,4	363,7	381,3	395,9	411,6	434,3	453,3	473,9	504,3	530,1
	2-Хлорфенол	279,6	290,4	306,1	319,1	333,3	354,2	371,7	391,1	420,1	445,0
	3-Хлорфенол	311,5	323,1	339,8	353,6	368,5	390,4	408,8	428,9	458,8	484,4
	4-Хлорфенол	317,3	329,0	345,9	359.8	375,0	397,0	415,5	435,8	465,9	491,6
	бйс-2-Хлорэтилацеталь	324,3	335,4	351,4	364,5	378,6	399,1	416,1	434,6	461,8	484,7
	1-Хлор-2-этилбензол	284,6	295,4	311,0	323,9	337,9	358,5	375,7	394,8	423,1	447,4
	1-Хлор-3-этил бензол	286,0	297,0	312,8	325,9	340,1	361,0	378,6	398,0	426,9	451,7
	1-Хлор-4-этил бензол	287,0	298,1	314,1	327,5	342,0	363,3	381,2	401,0	430,6	456,0
	1-Хлорэтилен	164,1	170,3	179,2	186,6	194,7	206,4	216,3	227,2	243,4	257,3
	2-Хлорэтил хлорацетат	313,3	324,4	340,4	353,6	367,8	388,5	405,7	424,6	452,4	475,9
	2-Хлорэтил-2-хлоризо-**пропиловый эфир**	292,3	303,0	318,4	331,1	344,8	364,9	381,6	400,0	427,2	450,4
	2-Хлорэтил-2-хлорпропи-ловый эфир	297,3	308,4	324,5	337,8	352,3	373,4	391,1	410,6	439.6	464,4
	1-Хлор-2-этоксибензол	313,1	324,4	340,6	354,1	368,6	389,7	407,3	426,7	455,2	479,5
	2-(2-Хлорэтокси)-этан ол	321,1	331,5	346,3	358,5	371,5	390,3	405,8	422,6	447,0	467,5
	Циан бромистый	234,1	241,2	251,4	259,7	268,5	281,1	291,5	302,6	318,8	332,2
	Циан иодистый	294,6	303,4	315,8	325,9	336,7	352,1	364,7	378,3	397,8	413,9
	2-Циано-2-бутил ацетат	310,4	321,2	336,7	349,4	363,2	383,1	399,8	417,9	444,5	467,0
	Циан фтористый	137,1	141,5	147,9	153,2	158,8	166,9	173,6	180,8	191,4	200,2
	Циан хлористый	193,1	199,5	208,6	216,0	224,0	235,5	245,0	255,4	270,4	283,1
	Циклобутан	177,0	183,9	194,0	202,3	211,4	224,8	236,1	248.7	267,4	283,5

Продолжение табл. 12.12

гво	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Циклобутен	170,4	177,2	186,9	195,0	203,8	216,8	227.8	240,0	258,2	273,9
Циклогексан	222,9	231,4	243,5	253,6	264,5	280,6	294,0	308,8	330,9	349,8
Циклогексанол	288,7	298,7	312,9	324,7	337,3	355,6	370,8	387,4	411,7	432,2
Циклогексанон	268,7	279,1	294,0	306,4	319,9	339.7	356,4	374,8	402,3	425,9
Циклогексанэтанол	318,0	329,0	344,7	357,6	371,5	391,6	408,4	426,6	453,3	475,9
Циклопентан	201,1	208,9	220,1	229,5	239,6	254,6	267,2	281,1	301,8	319,7
Циклопропан	153,1	158,8	166,9	173,6	180,8	191,4	200,3	210,1	224,5	236,8
Цитраконовый ангидрид	314,2	325,7	342,2	355,8	370,6	392,1	410,2	429,9	459,2	484,1
Энантлхлорид	302,9	311,5	323,5	333,3	343,7	358,4	370,4	383,3	401,7	416,9
Энантовая кислота	343,7	354,3	369,3	381,4	394,5	413,1	428,4	444,9	468,8	488,6
Энантовый альдегид	276,7		300,0	311,3	323,5	341,1	355,8	371,8	395,2	415,1
Энантонитрил	288,6	299^6	315,6	328,8	343,1	364,2	381,9	401,4	430,5	455,4
Эпихлоргидрии	252,1	261,3	274,6	285,5	297,4	314,7	329,2	345,0	368,5	388,6
1,2-Этокси-2-метилпропан	199,6	207,7	219,4	229,2	239,9	255,7	269,1	284,0	306,4	325,8
Этан	111,1	115,7	122,3	127,9	134,0	143,0	150,6	159,1	172,0	183,2
Этанол	236,6	246,5	257,8	267,0	276,9	291,2	303,0	315,9	334,6	350,3
Этилакрилат	238,4	247,2	259,9	270,5	281,8	298,5	312,4	327,7	350,4	369,8
а-Этилакрилнитрил	239,1	248,5	262,2	273,6	285,9	304,2	319,6	336,6	362,1	384,1
о-Этилакриловая кислота	315,5	325,3	339,2	350,6	362,7	380,1	394,4	409,9	432,2	450,8
Этиламин	187,4	194,2	204,0	212,1	220,9	233,6	244,3	256,0	273,2	287,9
Л'-Этилаиилин	306,2	317,6	334,1	347,6	362,4	383,9	402,0	421,8	451,3	476,4
4-Этиланилин	319,5	331,0	347,6	361,2	375,9	397,4	415,3	434,9	463,9	488,5
Этилацетат	226,0	234,2	246,1	255,9	266,5	281,9	294,9	309,1	330,0	347,9
Этилацетоацетат	296,3	306,9	322,2	334,8	348,4	368,2	384,7	402,8	429,5	452,2
Этилбензол	258,2	268,0	282,2	294,0	306,7	325,4	341,2	358,5	384,3	406,4
Этилбромид	195,2	202,6	213,5	222,5	232,2	246,6	258,7	272,0	291,8	308,9
Этил-а-бромизобутират	278,2	288,6	303,7	316,1	329,7	349,5	366,1	384,4	411,5	434,8
Этилбутират	249,8	259,2	272,8	284,1	296,3	314,1	329,2	345,7	370,2	391,3
Этилвинилдихлорсилан	–		271,5		295,7	314,2	329,8	347,1	372,9	395,1
3-Этилгексаи	247,8	257,1	270,6	281^8	293,9	311,6	326,5	342,9	367,3	388,2
Этилгликолат	282,8	292,9	307,3	319,1	332,0	350,6	366,1	383,1	408,1	429,3
2-Этилдисилазан	206,7	215,0	227,1	237,2	248,2	264,4	278,2	293,5	316,5	336,4
Этилдихлорацетат	277,3	287,5	302,1	314,2	327,2	346,3	362,3	379,8	405,7	427,8
Этилдихлорсилан	–	–	233,9	244,4	255,9	272,9	287,3	303,3	327,5	348,5
Этил-Л', Л--диэтилоксамат	343,8	356,1	373,7	388,2	403,9	426,7	445,7	466,5	497,2	523,2
Этилен	102,8	107,0	113,2	118,3	123,8	132,1	139,1	146,9	158,6	168,8
Этилена оксид	179,9	186,7	196,4	204,5	213,3	226,1	236,9	248,7	266,4	281,4
1,2-Этиленгликоль	322,3	332,8	347,7	360,0	373,1	392,0	407,7	424,6	449,3	470,0
Этилендиамин	257,3	266,4	279,3	289,9	301.4	318,0	331,9	347,0	369,3	388,1
Этилен-быс-(хлорацетат)	379,7	392,1	409,8	424,3	439,8	462,3	480,8	500,9	530,2	554,7
Этиленхлоргидрин	264,9	274,2	287,6	298,6	310,5	327,8	342,2	357,9	381,0	400,6
Этилизобутират	244,3	253,4	266,6	277,4	289 2	306,5	320,9	336,8	360,5	380,6
Этилизовалерат	262,0	271,7	285,5	297,0	309^5	327,6	342,8	359,5	384,2	405,3
Этилизокапронат	279,1	289,3	304,1	316,3	329,5	348,8	364,9	382,6	408,9	431,3
Этилизотиоцианат	255,5	265,2	279,3	291,0	303,7	322,4	338,0	355,3	381,1	403,2
Этилиодид	214,7	223,0	235,1	245,1	256,0	272,1	285,6	300,6	322,9	342,2
Этиллевулинат	314,8	325,9	341,8	355,0	369,2	389,8	406,9	425,7	453,3	476,7
Этил-/-лейци1!ат	298,0	309,2	325,4	338,8	353,4	374,7	392,6	412,3	441,6	466,6
Этилмеркаптан	192,7	200,1	210,9	219,8	229.5	243,7	255,7	268,8		305,6
Этилметиловый эфир	178,0	184,7	194,4	202,4	211,1	223,8	234,4	246,2	***263',6***	278,5
3-Этилпентан	230,7	239,4	252,0	262,5	273,8	290,4	304,4	319,7	342,6	362,2
Этилпропиловый эфир	204,4	212,6	224,4	234,3	245,2	261,1	274,6	289,6	312,1	331,6
Этилпропионат	240,5	249,2	261,7	272,1	283,3	299,6	313,3	328,2	350,3	369,2
Этилтриметилолово	238,5	247,8	261,1	272,2	284,3	302,0	317,0	333,5	358,1	379,3
Этилтрифторсилан	174,6	180,8	189,7	197,1	205,1	216,6	226,3	236,8	252,4	265,6
Этилтрихлорацетат	288,1	298,3	313,1	325,2	338,3	357,4	373,3	390,7	416,3	438,1
Этилтрихлорсилан	–	–	254,3	265,1	276,9	294,2	308,8	324,9	349,0	369,7
Этилтриэтоксисилан	–	–	304,9	317,1	330,3	349,5	365,6	383,3	409,4	431,7
2-Этилфенол	313,8	325,0	341,1	354,4	368,8	389,7	407,1	426,2	454,3	478,2
3-Этилфенол	327,7	338,8	354,6	367,6	381,6	401,8	418,6	436,8	463,5	486,0
4-Этилфенол	326,7	338,0	354,3	367,7	382,1	403,1	420,5	439,5	467.4	491,0
Этилформиат	207,6	215,4	226,4	236,0	246,2	261 0	273,5	287,2	307.6	325,0
Этилфторид	152.3	158,1	166,3	173,2	180.7	191.6	200,7	210,8	225,8	238,7

Вещество	Давление пара.кПа									
	0,1	0,2	0.5	•	2	5	10	20	50	100
Этил-2-фуроат	304,7	315,7	331,5	344,5	358,6	379,1	396,2	414,9	442,6	466,1
Этилхлорацетат	269,6	279,4	293,7	305,4	318,1	336,7	352,2	369.3	394,5	416,0
Этилхлорид	179,2	186,0	195,9	204,0	212,9	226,0	236,9	249,0	267,0	282,4
Этал-а-хлорпропионат	274,9	284,6	298,5	309,9	322,3	340,3	355,2	371,6	395,6	416.0
Этаддианацетат	337,0	347,3	362,0	373,9	386,7	405,0	420,0	436,2	459,6	479.1
Этилциклогексан	253,6	263,3	277,4	289,1	301,8	320,5	336,2	353,5	379,4	401,6
Этилциклопентан	236,0	245,0	258,0	268,9	280,6	297,9	312,4	328,4	352,3	372,7
Этил-о-9тилацетоацетат	307,9	318,9	334,7	347,7	361,8	382,3	399,4	418,1	445,7	469,1
Этокситриметилсилан	217,8	226,2	238,4	248,6	259,6	275,8		304,6	327,2	346,6
Янтарный ангидрид	354,6	366,8	384,2	398,5	414,0	436,3	454^9	475,2	504,9	529,9

Таблица 11.6. Давление паров органических веществ (выше 108 Па) [115]

i. 'C	р, 10^ Па	Л "С	р, 10» Па	*t,* "С	р, 10» Па	*t, "C*	р, 10» Па
Анилин (C_6H_5N)		420	5,479	277,0	40,52	120	3,986
		430	6,704	288,0	49,03	130	4,973
212,8	2,02	440	8,121			140	6,128
254,8	5,06	450	9,746	Бутен-1 (C4H8)		150	7,468
292,7	10,13	460	11,60			160	9,036
342,0	20,26	470	11,69	0	1,285	170	10,85
375,5	30,39	480	16,01	10	1,838	180	12,94
400,0	40,52	490	18,70	20	2,557	190	15,32
422,4	50,65	500	21,66	30	3,472	200	18,02
426,0	**53,08**	510	24,96	40	4,62	210	21,08
		520	28,62	50	6,02	220	24,52
Ацетилен (CrH^) (Г, К)		530	32,69	60	7,63	230	28,37
		540	37,19	70	9,59	234,7	30,31
192,4	1,283	550	42,18	80	11,93		
200,9	2,026	560	47,71	90	14,68	Гексен-1 (СбН.е)	
209.4		562,6	49,24	**,100**	**17,89**		
221.5	5,'065			**110**	**21,59**		
230,4	7,091	**и**-Бутан (C4H,o)		**120**	**25,84**	70	1,2398
240,7	16,13			**130**	**30,68**	80	1,6626
253,2	15,20	0	1,032	**140**	**36,15**	90	2,1885
263,0	20,26	10	1,483	**146,4**	**40,2**	100	2,8326
271,6	25,33	20	2,074			ПО	3,610
278,9	30,39	30	2,83	к-Бутилбензол (C,oH,4)		120	4,537
	35,45	40	3,78			130	5,629
29o',4	40,52	50	4,96	190	1,1917		
300,0	50,65	60	6,39	200	1,5018	я-Гептадекан (С17Нз5>	
307,8	60,78	70	8,10	210	1,8714		
308,7	62,45	80	10,13	220	2,3078	**310**	**1,1794**
		90	12,50	230	2,8185	**462**	**13,169**
Ацетон (СяНоО)			15,29	240	3,411		
		110	18,52	250	4,094	«-Гептан (CjHig)	
78,6	2,02	120	22,23	Бутин-1 (C4H,,)			
113,0	5,06	130	**26,48**			100	1,0606
144,5	10.13	140	**31,29**	10	1,06	120	1,8330
181,0	20,26	150	36,73	20	1,47	140	2,979
205,0	**30.39**	152,01	37,96	30	**1,70**	160	4,599
214,5	**40,52**			40	**1,96**	180	6,78
235.0	**47,61**	и-Бутанол (C4H10O)				200	9,71
				и-Гексан (CeHii)		220	13,54
Бензол (СеНв) (Г, К)		139,8	2,03			240	18,47
		172,5	5,06	70	1,0537	260	24,65
360	1,243	203,0	10,13	80	1,4239	267,01	27,36
S80	2,164	237,0	20,26	90	1,8876		
400	3,536	259,0	30,39	100	2,460		
410	4,428			110	3,153		

t, °C	*p*, 10⁵ Па
Гептен-1 (C_7H_{14})	
100	1,2180
110	1,6046
120	2,0797
130	2,6556
140	3,345
150	4,161
160	5,118
к-Декан ($C_{10}H_{22}$)	
180	1,1737
190	1,4921
200	1,8740
210	2,3274
220	2,8603
230	3,482
240	4,199
250	**5,022**
346	**21,07**
1.1-Диметилциклопентан (C	
90	1,0784
100	1,4263
110	1,8550
120	2,3756
130	2,9998
140	3,7397
150	4,6070
160	5,6137
Дифенил ($C_6H_5C_6H_5$)	
260	**1,08**
280	**1,74**
300	**2,38**
320	3,38
340	4,47
360	6,55
380	8,8
Дифтордихлорметан (фреон-12) (CF_2Cl_2)	
- 3 0	1,0143
- 2 0	1,527
- 1 0	2,219
0	3,125
10	4,285
20	5,739
30	7,529
40	9,687
50	12,28
60	**15,34**
70	**18,94**
80	**23,13**
90	**27,99**
100	**33,60**
111,8	**41,32**

t, °C	*p*, Па
Дифтормонохлорметан (фреон-22) (CHF_2Cl)	
- 4 0	1,054
—30	**1,641**
- 2 0	2,456
- 1 0	3,552
0	4,983
10	6,811
20	9,097
30	11,908
40	15,315
50	19,395
60	24,236
70	29,94
80	36,62
90	44,43
96,13	49,86
« Додекан ($C_{12}H_{26}$)	
220	1,1059
230	1,3890
240	1,7258
250	**2,1227**
386	**18,1**
Изопропилбензол ($C_6H_5CH(CH_3)_2$)	
160	1,2290
170	1,5656
180	1,9698
190	2,4498
200	3,0146
210	3,673
220	4,434
230	5,306
О/7/ИО-КсИЛОЛ (C_8H_{10})	
150	1,172
160	1,505
170	1,907
180	2,388
190	2,956

	p, 10⁵ Па
200	3,622
210	4,390
220	5,280
230	6,305
240	7,500
250	8,820
260	10,32
270	12,00
280	13,90
290	16,02
300	18,35
310	20,95
320	23,79
330	26,87
340	30,32
350	34,36
358,44	38,08
Метан (CH_4) (Г, К)	
115	1,324
120	1,920
125	2,691
130	3,671
135	4,895
140	6,375
145	8,136
150	10,33
155	12,88
160	15,88
165	19,38
170	23,38
175	27,88
180	32,88
185	38,54
190	45,52
190,55	46,41
Метанол (CH_4O)	
84,0	2,03
112,5	5,06
138,0	10,13
167,8	20,26
186,5	30,39
203,5	40,52
214,0	50,65
224,0	60,78
240,0	79,72
Метилацетилен (C_3H_4)	
—20	1,17
—10	1 ,84
0	**2,79**
10	**4,05**
20	**5.77**
30	**6,79**
40	8,00
50	10,84
60	14,38
70	18,64

t, °C	p. № Па
2-Метилбутадиен-1,3 (C_5H_8)	
40	1,2374
50	1,7012
60	2,2889
70	3,0202
80	3,915
90	4,996
100	6,282
2-Метилбутан (C_5H_{12})	
30	1,090
40	1,511
50	2,048
60	2,719
70	3,541
80	4,536
90	5,721
100	7,11
ПО	8,77
120	10,69
130	12,93
140	15,49
150	18,43
160	21,75
170	25,51
180	29,71
187,8	33.3
2-Метилпропен (C_4H_8)	
0	**1,315**
10	**1,87**
20	**2,58**
30	**3,50**
40	**4,64**
50	**6,06**
60	7,77
70	9,82
80	**12,26**
90	**15,09**
100	**18,37**
ПО	22,16
120	26,34
130	31,28
140	36,70
Метил хлористый (CH_3Cl)	
—20	1,188
—10	1,772
0	2,557
10	3,582
20	4,893
30	6,525
40	8,516
50	10,92
60	13,75
Метилциклогексан (C_7H_{14})	
ПО	1,2986
130	2,146
150	3,362
170	5,01

190	7,23
210	**10,10**
230	13,83
250	18,48
270	24,21
290	31,16

Метилциклопентан (C^Hig)

	1,2946
	2,238
	3,632
	5,59
	8,22
	11,73
	16,28
	22,05
	29,24

Монофтордихлорметан (фреон-2f) (CHFCl,)

	1,0578
	1,5305
	2,1534
	2,9550
	3,9655
	5,2160
	6,7389
	8,5675
	10,737
	16^245
	19,666
	23,593
	28,081
	33,195
	39,008
170	45,612
178,25	51,812

Монофтортрихлорметан (фреон-П) (CFCI3)

	1,748
	2,366
	3,138
	4,088
	5,240
	6.619
	8,253
	10,168
	12,393
	14,959
	17,896

Нафталин (СюНв)

220	1,060
230	1,321
	1,'993
	2,53

270	2,99
280	3,57
290	4,23
300	4,97
310	5,82
320	6,79
330	7,86
340	9,05
350	10,33
360	11,85
370	13,37

я-нонаяекан (Ci9H4<,)

340	1,195
	12,156

Я-Нонан (CgH^O)

160	1,2846
170	1,6410
180	2,070
190	2,579
200	3,179
210	3,879
220	4,689
230	5,618
322	**22,8**

(CsHis)

130	1,1408
150	1,9022
170	3,006
190	4,536
210	6,582
230	9,270
250	12,79
270	17,29
290	22,94
296,2	24,96

Октен-1 (CsHi,)

130	1,2843
140	1.6619
150	2,1202
160	2,6698
170	3,322
	4,086

Я-Пентан (CeHi^)

	1,156
	1,591
	2,145
	2,832
	3,676
	4,693
100	5,906
110	7,333
120	8,985
130	10,94
140	13,20
150	15,79
160	18,74
170	

	25,84
190	30,04
196,62	33,74

Пентен-1 (CeHio)

40	1,4162
60	2,5797
80	4,354
100	6,900
120	10,54
140	15,26
160	21,56
180	29,76
200	40,26
201	

Пропадиен (C3H4)

-30	1,22
-20	1,84
-10	**2,68**
O	3,81
10	5,28
20	7,14
25	8,24
30	9.47
40	12,4
50	15,8
	20,0
	24,8

Пропан (C3Hв) (7-. К)

231,10	1,013
259,83	3,039
275,24	5,065
	7,091
296^30	9,117
317,42	15,20
341,71	25,33
359,61	35,45
370,0	42,65

Пропанол-1 (CgHgO)

117,0	2,03
149,0	5,06
177,0	10,13
210,8	**20,26**
232,3	30,39
250,0	40,52
263,7	50,55

Пропилен (C3H5)

-40	1,425
-30	2,132
-20	3,08
—10	4,3
O	5,82
10	7,74
20	**10,10**
30	12,98
40	16,45
50	20,54
60	25,38
70	31,00

	37,47
90	44,88
91,9	46,0

Толуол (C,Hg)

120	1,312
140	2,180
160	3,433
180	5,165
200	7,474
220	10,93
240	15,26
	20,50
	26,69
300	33,82
310	37,74

Я-Тридекан (CisH^g)

240	1,1230
404	17,2

Трифтормонохлорметан (фреон-13) (CF3CI)

	1,094
	1,797
-50	4', 183
-40	6,017
-30	8,393
-20	11,40
-10	15,13
O	19,70
10	25,23
20	31 ,'84
??,13	39,00

Тетрафтордихлорэтан (фреон-114) (C2F4Cl2)

	1,836
	2,584
	3,453
	4,583
	5,963

Углерод четыреххлористый (CCУ

90	1,482
110	2,506
130	4,001
150	6,071
170	8,852
190	12,41
210	17,01
230	22,73
250	29,57
270	
J,05	

Хлорбензол (CjHsCI)

140	1,252
	2,044
180	3,158
200	4,693
220	6,739
240	9,434
260	12,85
329,2	31,90
359,2	45,22

Цинлогенсан (СбН,^)

90	1,3272
110	2,260
130	3,622
150	5,52
170	8,059
190	11,34
210	15,52
230	20,82
250	27,45
270	35,61

Циклогексен (С.Ню)

90	1,2450
100	1,6443
110	2,1358
120	2,7324
130	3,447
140	4,294
150	5,287

Циклопентан (CsH^)

50	1,038
70	1.905
90	3,252
110	5,211
130	7,950
150	11,67
170	16,58
190	22,87
210	30,74
230	40,39

Этан (С^Нв) (Т, К)

184,52	1,013
190	1,347
200	2,174
210	3,340
220	4,921
230	7,002
240	9,675
250	13,02
260	17,12
270	22,08
280	28,01
290	35,10
300	43,65
305,5	49,13

Этанол (CrHeO)

97,5	2,03
126,0	5,06
151,8	10,13
183,0	20,26
203,0	30,39
218,0	40,52
230,0	50,65
242.0	60,78
243.1	63,92

Этилацетат (CiHgO^)

80	1,110
100	2,022
120	3,447
140	5,552
160	8,489
180	12,42
200	17,60
220	24,33
240	33,06
250,1	38,49

Этилбензол (CgHio)

140	1,1211
150	1,4477
160	1,8440
170	2,319
180	2,883
190	3,546
200	4,317
210	5,208
220	6,229

Этилен (С2Н4)

0	40,94
2	42,84
4	44,79
6	46,82
8	48,92
9,5	50,6

Эфир диэтиловый (С4Н]оО)

	1,228
	2,311
	3,964
100	6,471
120	**10,01**
140	14,73
160	21,03
180	29,02
190	34,01
193,8	36,06

11.4. КОЭФФИЦИЕНТ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПНЫХ МОЛЕКУЛ

Коэффициент разделения двухкомпонентной жидкой смеси определяется как отношение относительных концентраций компонент Ci, *C2* в паре и в жидкости:

(Сг)пар /(Сг)жидк'

Для идеальных растворов, к которым относятся смеси изотопных молекул, коэффициент разделения равен отношению давлений пара чистых компонент:

В табл. 11.7 приведены значения коэффициента деления изотопных молекул.

Таблица 11.7. Значения коэффициента разделения молекул двухкомпонентных изотопных смесей при различной температуре

t, -с		*t,* 'С				*i.* "С	
Азота тетраоксид		Анилин		70	1,011	10	1,0241
				75	1,008	20	1,0249
WN2O4 — 1 W 5 N 0 4 [121]		С р , N - Q H , N [122]		80	1,006	30	1,0258
						40	1,0262
		50	1,036			50	1,0261
21	j 1,0038	55	1,026	Бензол		60	1,0254
		60	1,019			70	1,0251
		65	1,014	C c D e -	CвH« 1123]	80	1,0249
						82	1,0249

[124]

34,6	I	1,00025

Бор трехфтористый

"BP3 - "BP3 [125]

-120	1,0035
-115	1,0048
-110	1,00й0
-105	1.0072

Бор треххлористый

"BC13 - 10BC13 [126]

-85	0,9988
-80	0,9991
-70	0,9997
-60	1,0002
-50	1,0007
-40	1,0012
-30	1,0016
-20	1,0020
-10	1,0023
0,0	1,0026
10	1,0029
12,7	1,0030

п-Бутиловый спирт

C4DIOO-C4Hi„0 [121]

20	1,063
30	1,059
40	1,054
50	1,050
60	1,046
70	1,042
80	1,038
90	1,034
100	1,031

Вода

H2O—D2O [127]

0,0	1,255
10	1,182
20	1,154
30	1,137
40	1,122
50	1,107
60	1,094
70	1,081
80	1,071
90	1,061
100	1,052
ПО	1,045
120	1,038
130	1,032
140	1,027
150	1,022
160	1,018
170	1,014
180	1,011

t, °C	
190	1,008
200	1,005
210	1,003
220	1,001
230	0,9989
240	0,9958

-T,0 [128]

20	1,113
30	1,096
40	1,076
50	1,064
60	1,052

Hr^O-Hr'Ю [129]

20	1,0093
30	1,0085
40	1,0077
50	1,0069
60	1,0062
70	1,0055
80	1,0049
90	1,0043
100	1,0037
ПО	1,0032
120	1,0027
130	1,0022
140	1,0018
150	1,0013
160	1,0009
170	1,0005
180	1,0001
190	0,9998
200	0,9994
210	0,9991

Hr^Ю-Hr^O [130]

1,0039
1,0030

Водород хлористый

№6C1-H="C1 [1311

-105	1.0021
-100	1,0019
-95	1,0017
-90	1,0015

Диборан

[74]

-155	1,0525
-150	1,0495
-140	1,0456
—130	1,0439
—120	1,0442
-110	1,0449
—100	1,0478
-90	1,0516

Изовалериановая кислота

CsHioO^-CsDioO^ [122]

55	1,034
60	1.036
70	1.037
80	1.038
90	1.039
100	1,039
110	

Изомасляная кислота

C4H8O2--C4D8O2 [122]

1,015
1,022
1,029
1,035
1,041

Изопропиловый спирт

C3O^O-C3H^O [122]

15	1,065
20	1,062
30	1,055
40	1,048
50	1,042
60	1,037
70	1,033
80	1.029

Кислород

[132]

—210	1,0131
—205	1,0121
-200	1,0112
—195	1,0105
— 190	1,0098
-185	1,0092
—182,97	1,0089

Криптон

в2Кг_86Кг [133]

-152	I	1.00048

Ксенон

130Xe_1з6Xe [133]

-108	[	1,0001

Литий

"Li-'Li [134]

400	**1,060**
450	1,047
500	1,036
550	1,026

Масляная кислота

C4H8O2-C4D8O2 [122]

50	1,010
60	1,029
70	1,047
80	1,060
90	1,055
100	1,049
ПО	1,043
115	1,040

Метан

CD4-CH4 [135]

182,7	I	1,0130

«CH4-13CH4 [131]

	1,0114
	1,0112
-175	1,0108
-170	1,0105
-165	**1,0102**
-161,3	1,0098

Метиловый спирт

13CH4O-12CH4O [124]

34,6	I	1,0002

Неон

20Ne_22Ne [136J

-256,74
—256
—255
-254
-253
-252
—251
—250
-249
-248
—247
—246
-245
-244
—243

Пентаборан

B5D9-B5H9 (93J

—45	1,0656
—40	1,0634
—30	1,0593
—20	1,0555
—10	1,0521
0,0	1,0489
10	1,0460
20	1,0434
30	1,0409

f. "С		Л *-С*		*i. "С*		*t. "С*	
40	**1,0387**	Углерод четыреххлористый		Циклогексан		цис.С,Н,0,-С,И^ [141]	
50	**1,0366**	13СС14—12СС14 [124]		CeDi2-C,Hi2 [123]		-160	1,0030
60	**1,0347**	34.6 1	1,0013	10	1,0933	-150	1,0064
Сфнистый газ		Уксусная кислота		20	1,0903	-140	1,0095
s^SOs—[137]		Cr040,-CrH40, [139]		30	1,0877	-130	1,0121
—35 1	1,0018	20	1,0457	40	1,0837	—120	1,0136
Сероводород		30	1,0450	50	1,0809	-ПО	1,0146
На^^S—H^s^s [137]		40	1,0440	60	1,0774	— 100	1,0153
—76	1,0055	50	1,0438	**70**	1,0744	-90	1,0157
—65	1,0058	60	**1,0432**	**80**	1,0683	трскс-СаНгПг—С2Н4 [141J	
Углерода окись		70	**1,0427**	Этилен		-160	1,0047
i2co_i3CO 1138]		80	**1,0423**	C2H3D—C2H4 [140]		-150	1,0085
-204	**1,0130**	90	**1,0418**	**—154,88**	1,0024	-140	1,0112
-200	**1,0119**	100	1,0414	-150	1,0033	-130	1,0131
—195	**1,0106**	110	1,0410	—140	1,0046	-120	1,0143
-190	**1,0094**	120	1,0406	—130	1,0055	-110	1,0153
-185	**1,0084**	125	1,0405	—120	1,0062	-100	1,0159
-180	**1,0075**	Хлороформ		—110	1,0067	—90	**1,0162**
-175	**1,0067**	«CH3Cl—1^**CH3C! [124]**		— 100	1,0070	геж-СгНгОг-СаН^ [141]	
—170	1,0059	34,6	**1,0008**	-91,85	1,0071	-160	1,0032
						-150	1,0084
						— 140	1,0096
						-130	1,0123
						—120	1,0138
						-110	1,0148
						-100	1,0155
						-90	1,0159

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ривкин **с.** Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Чайхорский А. А. Химия нептуния. М.: Атомиздат, 1978.
3. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. академика И. R. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
4. Carniglia S. C., Gunningham B. B.//J. Amer. Chem. Soc. 1955. Vol. 77. № 6. P. 1502—1509.
5. Erway N. D., Simpson O. C.//J. Chem. Phys. 1960. Vol. 18. P. 983—984.
6. Green J. W. Ibid. 1964. Vol. 41, Aъ 8. P. 2245—2249.
7. Щукарев С. А., Семенов Г. А.//Журн. неорган, химии. 1957. Т. 2. Вып. 6. С. 1217—1220.
8. Blauer J. A., Greenbaum M. A., Farber M.//J. Phys. Chem. 1965. Vol. 69, N9 3. P. 1069—1073.
9. Greenbaum M. A., Foster J. N.. Arin M. L. e. a.// Ibid. 1963. Vol. 67, № 1. P. 36—41.
10. Greenbaum M. A., Yates R. E., Farber M.//Ibid. 1963. Vol. 67, ЛЪ 9. P. 1802—1803.
11. Soulen J. R., Sthapitanonda P., Margrave J. L.// Ibid. 1955. Vol. 59, № 2. P. 132—133.
12. Darnell A. J.. Yosim S. J.//Ibid. 1959. Vol. 63, Ws 11. P. 1813—1821.
13. Blackburn P. E., Hoch M., Jonston H. L.//Ibid. 1958. Vol. 62, № 7. P. 769—771.
14. Smith P. J., Barrow R. F.//Trans. Faraday Soc. 1958. Vol. 54, № 426. P. 826—828.
15. Щукарев С. А., Семенов Г. А., Ратьковский И. А. //Журн. неорган, химии. 1961. Т. 6. Вып. 8. С. 1973—1975.
16. Лю Цюнь-Хуа, Пашинкин А. С., Новоселова А. В. //Там же. 1962. Т. 7. Вып. 5. С. 963—964.
17. Давыдов В. И., Диев Н. П.//Там же. 1957. Т. 2. Вып. 9. С 2003—2004.
18. Chikara Hirama//J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66, № 8. P. 1563.
19 Habermann C. E., Daane A. H.//J. Chem. Phys. 1964. Vol. 41, № 9. p. 2818—2821.
20. Maclaren R. O., Gregory N. W.//J. Phys. Chem. 1955. Vol. 59, № 2. P. 184—186.
21. Sime R. J., Gregory N. W.//J Phys. Chem. 1960. Vol. 64, Ко 1. P. 86—87.
22. Щукарев С. А., Семенов Г. А., Ратьковский И. А. и др.//Журн. общ. химии. 1961. Т. 31. Вып. 7. С. 2090—
23. Ackermann R. J., Rauh E. G.//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36, 2. P. 448—449.
24. Пашинкин А. С., Дробот Д. В., Шевцова З. Н. и др.//Журн. неорган, химии. 1962. Т. 7. Вып. 12. С. 2811—2812.
25. Bloom H., Bockris O'M., Richards N. E. e. a.// J. Amer. Chem. Soc. 1958. Vol. 80, 9. P. 2044—2046.
26. Pugh A. C. P., Barrow R. F.//Trans. Faraday Soc. 1958. Vol. 54. Part 5, Кя 425. P. 671—673.
27. Schuiz D. A., Searcy A. W.//J Phys. Chem. 1963. Vol. 67, Я: 1. P. 103—104.
28. Blue C. D.//Ibid. 1963. Vol. 67, 4. P. 877—879.
29. Hildenbrand D. L., Potter N. D.//Ibid. 1963. Vol. 67, Ко 10. P. 2231—2233.

30. Bautista R. G., Margrave J. L.//Ibid. 1963. Vol. 67. №11.P. 2411—2417.
31. Hidenbrand D. L., Potter N. D.//J. Chem- Phys. 1964. Vol. 40, 10. P. 2882—2884.
32. Eick H. A., Mulford R. N. R.//Ibid. 1964. Vol. 41, Vb5. P. 1475-1479.
33. Farber M., Meyer R. T., Margrave J. L.//J. Phys. Chem, 1958. Vol. 62, № 7. P. 883—884.
34. Нестерова Я. М., Пашинкин А. С., Новоселова А. В.//Журн. неорган, химии. 1961. Т. 6. Вып. 9. С. 2014—2017.
35. Hirayama C., Ichikawa Y., De Roo A. M.//J. Phys, Chem, 1963. Vol. 67, № 5. P. 1039—1042.
36. Dreger L. H., Margrave J. L.//Ibid. 1960. Vol. 64, №9. P. 1323-1326.
37. Zavitsano P. D.//Ibid. 1964. Vol. 68, № 10. P. 2899,
38. Phipps T. E.//Доклад № 735 на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955.
39. Ruf R., Treadwell W. D.//Helv. Chim. Acta. 1954. Vol. 37, № 7. p. 1941—1944.
40. Зломанов В. П., Поповкин Б. А., Новоселова А. В.//Журн. неорган, химии. 1959. Т. 4. Вып. 12, С. 2661-2663.
41. Пашинкин А. С., Новоселова А. В.//Там же, 1959. Т. 4, Вып, 2. С. 2657—2659.
42. Житенева Г. М., Румянцев Ю. В., Болондзь Ф. М. //Тр. Восточно-Сибирского филиала СО АН СССР. 1962. Вып. 41. С. 121—124.
43. Spedding F. H.//Trans. Amer. Soc. Metals. 1960. Vol. 218. P. 608—611.
44. Krikorian O. H.//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, №8. P. 1586 -1590.
45. Карелин В. В., Несмеянов А. Н., Приселков Ю. А.//ДОКЛ. АН СССР. 1962. Т. 144, № 2. С 352-355.
46. Геков Л. Х., Несмеянов А. Н., Приселков Ю. А.// Вести. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1962. № 5. с. 34—35.
47. Шахтахтинский М. Г., Кулиев А. А.//Докл. АН СССР. 1958. Т. 123, № 6. С. 1071—1074.
48. Зломанов В. П., Поповкин Б. А.//Журн. неорган, химии. 1958. Т. 3. Вып. 7. С. 1473—1476.
49. Franzen H. P., Gills P. W.//J. Chem Phys. 1965. Vol. 42, № 3. P. 1033—1039.
50. Darnell A. **J.,** Keneshca F. **J**.//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, №9. P. 1143—1144.
51. Справочник химика/Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Химия, 1971. Т. 1.
52. Щукарев С. А., Василькова И. В., Ефимов А. И.// Журн. неорган, химии. 1956. Т. 1. Вып. 10. С. 2272—2277.
53. Sime R. **J.,** Gregory N. W.//J. Amer. Chem. Soc. 1960. Vol. 82, № 4. P. 800—801.
54. Allen T. L.//Ibid. 1956. Vol 78, № 21. P. 5476—5477.
55. Scheer M. D., Fine J.//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36, № 6. P. 1647—1648.
56. Несмеянов А. Н., Сазонов Л. А.//Журн. неорган, химии. 1960. Т. 5. Вып. 3. С. 519—520.
57. Ahman D. H.//U. S. Atomic Energy Comissi on AECD. № 3205. P. 1951—1956,
58. Круглих А. А., Павлов В. С.//Укр. физ. журн 1965. Т. 10, No 9. С. 1029—1031.
59. Несмеянов А. Н., Иофа Б. З., Стрельников А. А.// Журн. физ. химии. 1958. Т. 32, № 4. С. 955—957.
60. Pierce L., Pace B. L.//J. Chem. Phys. 1955. Vol. 23, № 3. P. 551-553.
61. Баймаков А. Ю.//Тр. Ленингр. политехи, ин-та. 1957. № 188. t. 156—159.
62. Sherman R. H., Glaugue W. F.//J. Amer. Chem. Soc. 1955. Vol. 77, № 8. P. 2154—2156.
63. Новиков Г. И., Гаврюченков Ф. Г.//Журн. неорган. химии. 1964. Т. 9. Вып. 2. С. 475**—477.**
64. Andersen H. C., Belz L. H.//J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, № 19. p. 4828—4829.
65. Rogers M. T., Speirs J. L.//J. Phys. Chem. 1956. Vol. 60, № 10. P. 1462—1464.
66. Verne L., Trevorrow E.//Ibid. 1958. Vol. 62, № 3, P. 362—363.
67. Рубан И. Н., Пономарев В. Д.//Тр. Ин-та металлургии и обогащения АН КазССР. 1962. Т. 5. С. 34—36.
68. Щукарев С. А., Суворов А. В.//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия 1961. № 4. С. 87—88.
69. Щукарев С. А., Новиков Г. И., Коковин Г. А.// Журн. неорган, химии. 1959. Т. 4. Вып. 10. С. 2185 -2188.
70. Щукарев С. А., Новиков Г. И., Андреева Н. В.// Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1959. № 4. С. 120-122.
71. Сун Инь-Чжу, Морозов И. С.//Журн. неорган, химии. 1959. Т. 4. Вып. 2. С. 492—493.
72. Palko A. A., Ryon A. D., Kuhn D. W.//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 3. P. 319—321.
73. Gibbs S. G., Shapiro **J**.//J. Chem. Phys. 1959. Vol. 30, № 6. P. 1483—1485
74. Ditter J. P., Perrine J., Shapiro J.//J. Chem. Engng. Data. 1961. Vol. 6, № 2. P. 271—272
75. Clarke J. T., Rifkin E. B., Johnston H. L.//J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, № 4. P. 781—785.
76. Wirth H. E., Palmer E. D.//J. Phys. Chem. 1956. Vol. 60, №7. p. 911—913.
77. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976.
78. Поляченок О. Г., Новиков Г. И.//Журн. неорган, химии. 1963. Т. 8. Вып. 12. С. 2631—2634.
79. Maclaren R. O., Gregory N. W.//J Phys. Chem. 1955. Vol. 59, № 2. P. 184—186.
80. Фадеев В. Н., Федоров П. И.//Журн. неорган, химии. 1963. Т. 8. Вып. 8. С. 2007—2008.
81. Исакова Р. И., Нестеров В. Н., Шендяпин А. С.// Там же. 1963. Т. 8. Вып. 1. С. 18—21.
82. Толмачева Т. А., Андриновская Т. Л.//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1960. № 10. С. 131—134.
83. Bloom H., Welch B. J.//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 12. p. 1594—1595.
84. Long L. H., Cattanach J.//J. Inorg. Nucl. Chem. 1961. Vol. 20, № 3/4. P. 340—341.
85. Li J. C. M.//J. Amer. Chem. Soc. 1956. Vol, 78, №6. P. 1081—1083.
86. Щукарев С. А., Василькова Н. В., Шарунин Б. Н. //Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1961. №22. С. 130-131.
87. Девятых Г. Г., Фролов И. А.//Журн. неорган, химии. 1963. Т. 8. Вып. 2. С. 265—268.
88. Cubicciotti D., Eding H.//J. Phys. Chem. 1965. Vol. 69, № 8. P. 2743—2744,
89. Исакова А. И., Нестеров В. Н.//Тр. Ин-та металлургии и обогащения АН КазССР. 1962. Т. 5. С. 29—30.
90. Бердоносов С. С., Лапицкий А. В., Баков Е. К.// Журн. неорган, химии. 1965 Т. 10, Вып. 2. С. 322—324
91. Тарасенков Д. Н., Командин А. В.//Журн. общ. химии. 1940, Т. 10. Вып. 14. С. 1319—1320.
92. Клушин Д. Н., Черных В. Я.//Журн. неорган, химии. 1960. Т. 5. Вып. 7. С. 1409- 1412.
93. Shapiro I., Ditter T. P.//J. Chem. Phys. 1957. Vol. 26, № 4. P. 798—801.
94. Koehler J. K., Giaugue W. P.//J. Amer. Chem. Soc. 1958. Vol. 80, № 11. p. 2659—2662.
95. Jarry R. L.//J. Phys. Chem. 1957. Vol. 61, № 4. p. 498—499,
96. Weinstock B., Malm J., Wealer E. E.//J. Amer. Chem. Soc, 1961. Vol. 83, № 21. P. 4310—4317.
97. Malm J. G., Selig H.//J. Inorg. Nucl. Chem. 1961. Vol. 20, № 3/4. P. 189—190.

98. Барышников Н. В., Зеликман А. Н., Теслицная М. В.//Журн. неорган, химии. 1962. Т. 7. Вот. 11. С. 2634—2635.
99. Никольский А. Б.//Там же. 1963. Т. 8. Вып. 5. С. 1045—1048.
100. Никольский А. Б.//Там же. 1965. Т. 10. Вып. 1. С. 290—291.
101. Зорин А. Д., Девятых Г. Г., Крупнова Э. Ф. и др.//Там же. 1964. Т. 9. Вып. 10. С. 2280—2283.
102. Вегка L.//J Inorg Nucl. Chem. 1960. Vol. 14, ЛЬ 3/4. Р. 190—192.
103. Щукарев С. А., Курбанов А. Р.//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1962. № 10. С. 144—145.
104. Кудрявцев А. А., Устюгов Г. П.//Журн. неорган. химии, 1961. Т. 6. Вып. П. С. 2421—2422.
105. Кудрявцев А. Д., Устюгов Г. П.//Тр. Моск. химико-технологич. ин-та им. Д. И. Менделеева. 1962. Вып. 38. С. 42-44.
106. Machol R. **E.**, Westrum **E.** F.//J. Amer. Chem. See. 1958. Vol. 80, № 12. P. 2950 2952.
107. Selig H., Malm J. G.//J. Inorg. Nucl. Chem. 1962 Vol. 24, № 11. P. 641—643.
108. Smith W. T., Cobble J. W., Boyd G. E.//J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, № 23. P. 5773—5774.
109. Pace E. L., Turnbull B. F.//J. Chem. Phys. 1565. Vol. 43, № 6. P. 1953—1955.
110. Pike F. P., Foster C. T.//J. Chem. Engng. Data. 1959. Vol. 4, № 4. P. 305—307.
111. McDougall L. A., Kilpatrick J. E.//J. Chem. Pnys. 1965. Vol. 42, № 7. P. 2311—2321.
112. Langer S., Blaukenspir F. F.//J. Inorg. Nucl. Chem. 1960. Vol. 14, № 1/2. P. 26—28.
113. Kenesha F. J., Cubissiottl D.//J. Chem. Phys. 1964. Vol. 40, 1. P. 191—199.
114. Нестеров В. Н., Пономарев В. Д.//Изв. АН КазССР. Сер. Металлургия, обогащение и огнеупоры. 1959. Вып. 1(4). С. 80—82.
115. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
116. Малышев В. В.//Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12. С. 743—748.
117. Comite Consultatif de Thermometrie. 14 Session, 1982. Recommendation Tl. P. T85—T86.
118. Малышев В. В.//Теплофизика высоких температур. 1973. Т. И. С. 1010—1016.
119. Clegg H. P., Rowlinson J. S., Sutton J. R.//Trans. Farad. Soc. 1955. Vol. 51. P. 1327—1329.
120. Малышев В. В.//Атомная энергия 1973. Т. 34 С. 42—45.
121. Begun G. M.//J. Chem. Phys. 1956. Vol. 25, № 6. P. 1279—1280.
122. Рабинович Н. Б., Соколов Н. Н., Артюхин П. И.///Докл. АН СССР. 1955. Т. 105. № 4. С. 762-763.
123. Davis R. T., Schisser R. W.//J. Phys. Chem. 1953. Vol. 57, № 9. P. 966—969.
124. Baerstschi F.//Nature. 1953. Vol. 171. P. 1018-1020.
125. Севрюгова Н. Н., Уваров О. В., Жаворонков Н. М.//Журн. физ. химии. 1960. Т. 34, № 5. С. 1004—1005.
126. Севрюгова И. И., Уваров О. В., Жаворонков Н. М.//ДОКЛ. АН СССР. 1959. Т. 126, № 5. С. 1044-1045.
127. Теплофизические свойства веществ: Справочник/ Под ред. Н. Б. Варгафтика. М.—Л.: Госэнергоиздат. 1956.
128. Smith H. A., Fith K. R.//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, No 4. P. 920—921.
129. Уваров О. В., Соколов Н. М., Жаворонков Н. М.// Журн. физ. химии. 1962. Т. 36, Ws 12. С. 2699—2702.
130. Borowitz J. L.//J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66, № 8. P. 1412—1414.
131. Матвеев К. И., Уваров О. В., Жаворонков Н. М.// Докл. АН СССР 1959. Т. 125, № з. **с.** 580—581.
132. Девятых Г. Г., Зорин А. Д.//Журн. физ. химии. 1956. Т. 30. Вып. 5. С. 1133—1135.
133. Григорьев В. Н.//Там же. 1962 Т. 36. Вып. 8. С. 1779—1780.
134. Катальников С. Г., Андреев Б. М.//Атомная энергия. 1961. Т. П. С. 240—243.
135. Armstrong G.**//J.** Chem. Phys. 1953. Vol. 21. P. 1293—1296.
136. Bigeleisen J., Roth E.//Ibid. 1961. Vol. 35, № 1. P. 68—70.
137. Девятых Г. Г., Сулоев Ю. И., Зорин А. Д.//Тр. Моск. химико-технологического ин-та по химии и хим. технологии. 1958. Вып. 1. С. 24—26
138. Севрюгова Н. И., Жаворонков Н. М.///Докл. АН СССР. **т. 134, No 4.** С. **875—876.**
139. Potter A. **E.**, Ritter H. L.**//J.** Phys. Chem. 1954. Vol. 58, № 11. P. 1040—1044.
140. Bigeleisen J., Stern M. J., Von Hook W. A.**//J.** Chem. Phys. 1963. Vol. 38, 2. P. 497—504.
141. Bigeleisen J., Ribinkar S. V., Von Hook W. A.// Ibid. 1963. Vol. 38, № 2. P. 489.

ГЛАВА 12

ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ

Э. Б. Гельман

12.1 ВВЕДЕНИЕ

Переход вещества из твердого состояния в жидкое называется плавлением; переход из конденсированного (твердого или жидкого) состояния в газообразное (пар) — испарением. В естественных условиях плавление является равновесным процессом; испарение становится равновесным, если внешнее давление равно давлению пара. Равновесное испарение из жидкого состояния называется кипением, из твердого — сублимацией (возгонкой).

Процессы плавления, кипения и сублимации совершаются с поглощением теплоты, которая называется соответственно теплотой плавления ДЯпл, кипения ДЯкип и сублимации ДЯсубл данного вещества.

12.2. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Плавление, кипение и сублимация чистых веществ при постоянном давлении происходят при некоторой характерной для данного вещества температуре, называемой температурой плавления Гпл, кипения Гкип и сублимации Гсубл вещества. В табл. 12.1—12.3 приведены температура и теплота плавления и кипения (или сублимации) при нормальном давлении для элементов, неорганических и органических соединений.

Таблица 12.1. Температура *t*, и теплота плавления и кипения (или сублимации) *АН*, кДж/моль, элементов и некоторых изотопов при нормальном давлении 101 326 Па. Выделены значения, разброс которых по различным источникам превышает 10%

			'субл	Литература
Азот, N,	—210,012	0,7207 [4]	—195,812	5,59 [10]
Азот, «N2	-210,96 [12]	0,7205	-195,76	5,592
Азот, "Na	—210,01			
Актиний	1050	12	3297 [10]	378
Алюминий	660,24 [10]	**10,8**	2520	293
Америций	1180	14,4	«2400 [И]	230
Аргон	-189,30	1,190	-185,9	6,5
Астат	302	8.8 [6]	334	90.4 [4]
Барий	727	**7.53,6,**	1640 [9]	139
Бериллий	1287		2471	291 **11]**
	2075	23	3700	512
	7,25	10,57	59,2	29.5
Ванадий	1917	17,6 [6]	3392	445 [1]
Висмут	217,4	П,()	1552	177
Водород, н-Н^	-259,19	0,117	-252,77	0,916
пара-Водород, ***пара-Н***^	—259,27	0,117	-252,87	0,900
орто-Водород, орто-Н2	-254,52	0,197		
Водородотритий, НТ	—254,7		-249,6	
Вольфрам	3420	[6]	5680	770
Гадолиний	1313 [9]	10,0	3280	360
Галлий	29,78 [4]	5,59 [2]	%2300 [9, 11]	256
Гафний	2230 [10]	23,9 [6]	^4900 [9, 11]	569
Гелий, аде	-271,4 (3,00МПа)	0,007(3,00 МПа)	-268,934 [9]	0,0837 [4]
		При нормальном давлении твердая фаза отсутствует		
Гелий-3, аде			—269.95	0,0478
Германий	237,2		2847 ПО]	
Гольмий	1474 [9]		2695 [10]	240 [1]
к-Дейтерий, H-Dg	—254,42	0,197	-249,9 [10]	1,226 [4]
орто-Дейтерий, орто-Dz			—249,56	1,223
Дейтероводород, HD	-256,5	0,1548	—251,02	1,109Г-256,5°С)
Дейтеротритий, DT	—253,5			
	1409	10,9	2562	**228**
Европий	822 [10]	9,2	1597	147
Железо	1538 [10]	13,8		350
Золото	1063,4	12,6	2877	331
Индий	156,4	3,34 [6]	2024	**228**
Иод, I,	113,6	15,77 [4]	184,35 [9]	41,8
Иридий	2447		4380	613
Иттербий	824		1211	130
Иттрий	1528	И	3337 [10]	
Кадмий	320,9 [9]	6.2	766,5	
Калий	63,5 [10]	2,33	761	**76,6**
Кальций	842	8,66 [6]		152
Кислород. Ог	-218,79 [3]	0,4459 [3]		6,833
Кобальт	1492	16,3		376
Кремний	1415 [10]	49,8		356
Криптон	-157,37	1,64	-153,22	9,046
Ксенон	—111,85	2,29	—107,96 [10]	12,63
Кюрий	1340			
Лантан	920		3454	413
Литий	180,54		1347	138
Лютеций	1663 I	18,8	3395	356
Магний	650	8,56 [6]	1107 [И	128
Марганец	1245	**12.1 [6]**	2080 "	227
Медь	1083	13,0	2543	302
Молибден		36	**«4700 [1, 10]**	582
Мышьяк (серый)	Субл.		615,0	31,8

Элемент	'пл		'кип- 'субл	Д^кип, Д^субл
Натрий	97,9	2,60 [6]	886	90,1
Неодим	1024	10,68	3080	255
Неон, Ne	−248,52	0,33	−245,93	1,79
Неон, 20Ne	-248,49	0,331	—	—
Неон, 22Ne	-248,31	0,334	—	—
Нептуний	637	52	^ъ4000 [1, 9]	422
Никель	1455	17,6	=^2800 [9, И]	370
Ниобий	2469 [10]	28	^4800 [9, И]	662
Олово (серое)	231,97 [9]	7,2	−2450 [9, И]	296,1
Осмий	3045	31,8 [6]	5027	748 [1]
Палладий	1554	17	-3000 [9, 10]	353
Платина	1772	fl'	3827	511 [1,2]
Плутоний	639,7		=3300	351
Полоний	254	12,6 [6]	962	59
Празеодим	932	6,9	^3360 [9, 10]	297
Прометий	==1100	10,5 [6]	===2600	—
Протактиний	1572 [101	16,7	;%3780 [10, И]	481,5
Радий	700	9,2 [6]	^1320	132 [1]
Радон	-71 [10]		-61,9	16,8
Рений	3180 [10]	33,? [6]	5627 [9]	716 [8]
Родий	1963	21,8 [61	^3680 [9, 11]	496
Ртуть	-38,89	2,30	356,66	59,23
Рубидий	39,49	2,19	686,04	70
Рутений	2250	24,3 [6]	=4050 [91	602
Самарий	1072	8,6	1778	166
Свинец	327,44 [101	4,77	1745	178
Селен (серый)	217	6,7 [6]	685	29
Сера (Р, моноклин.)	119,3	1,72	444,6	9,2
Сера (а, ромб.)	112,8	—	444,6	9,2
Серебро	960,5	11,3 [6]	2167	251
Скандий	1541	14,2 [6]	2831 [9]	315
Стронций	768	8	1384 [9]	134
Сурьма	630,5	20,1	1634	124,4
Таллий	303,5	4,2	1457	162,4
Тантал	2996 [91	35	=5350 [9, И]	745
Теллур	449,8	17,5	990	51,0
Тербий	1356 [9]	10,8	3200	331
Технеций	2200	24	«4260 [9, И]	593
Титан	1608 [101	15,1	3287 [9]	410
Торий	1750	16,7 [1, 6]	4790 [9]	540
Тритий, Та	-252,53	0,23	-248,11	1,39
Туллий	1545	16,9	^1840 [9, 11]	191
Углерод (графит)		Субл.	4200	–
Уран	1134	9,2	=4030 [1, 10]	494
Фосфор (белый)	44,1	0,66	257	13,1
Фосфор (красный)		Субл.	429	29,8
Фосфор (черный)		Субл.	453	–
Франций	26,84 [10]	2,1 [6]	677	64
Фтор, F^	-219,6	0,510	-188,13	6,54
Хлор, Cla	-101,03	6,61	-34,1	20,41
Хром	1877 [10]	16,3 [61	2672 [9]	338
Цезий	28,5	2,10	672	67
Церий	799	5,2 [1]	«3340 [9, 10]	409 [1]
Цинк	419,5	7,2	906,2	115,3
Цирконий	1852 [101	14,6	4340	558
Эрбий	1525	19,9	«2690 [9, 10J	261
Эйнштейний	860	—	—	–

Таблица 12.2. Температура *t*, X, и теплота плавления и кипения ДЯ, кДж/моль, неорганических соединений при нормальном давлении 101 325 Па. Обозначения: пл - плавлени субл.—сублимация (возгонка), взр. —взрывается, разл, —разлагается [1]

Вещество		AWjjjj	'кип* 'субл	- г »	Литература	Вещество	'пл		'кип. 'субл	дн . А^субл	Литература
AcBr3		субл.	800	—	—	BsNgHe	- 5 8		55	29,3	
AcCl3	802	36,0	1760	188	[2]l		450	24,6	2124	356.3	[3]
AcP3	1327	33,4	2277	251	2]l		857	32,2	1980	232	
	1977	83,7	—	—	2,3]	BaCO3			1400 (разл.)		—
s s ^	424	8.8	1502	198	4] 1	BaCla	960	15,9	2050	241	—
AgCN	350	11,5	—	—	—	BaF,	1370	17,6	2250	271	—
AiCl	455	13,2	1557	184	51	BaH,,	1200	25			
AgClOg	231		270 (разл.)			**BaL**	711		1900		—
AgF	435	17	1147	142	[2]l	**BaMo04**	1460		1730		
AgF,	690	18,4	1227	150,5	[2]l	**BaO**	1923	57,7	2727	259,6	[3,4]
Agl	554	9,4	1506	143,9	[4]	BaOr	450	23,9	837 (разл.)		[2,3]
AgNOs	209	12,1	300 (разл.)		—	Ba,0	607	21,8	767	83,7	[3]
Ago	110 (взр.)		—	—	—	Ba(OH)2	408	15	—	290	
Ag'O	187	15,5 (разл.)		—	[3]	BaS	>2200	—	3000	435	[2,7]
Ag3P04	849	—	—	—		BaS04	1350	40,6	—	—	[4]
Ag'S	838	14,1	разл.	—	—	BaSe	1780	38	—	—	
AfeS04	657	17,9	>1085 (разл.)		[4]i	BaW04	1475	—	1730	—	—
AgsSe	897	17,58	разл.	—	[6]l	BeAl204	1870	171,5	—	—	—
Ag,Te	960	21,4			[6l	$BeBr_2$	508	18	540	98	
AIBi,	2159					Be^C	2400	75,4	2537		[7]
	- 6 4 , 5	—	44,5	30,0	[4,5]	BeCU	415	15,3	550	ПО	
	97,5	11,3	256,2	23,5	[4	BeF^	800	21	1175	200	—
	2100	—	—		[2	**Be1,**	490	18	530	98	—
ЛЙ	—	субл.	180,2	56,1	[2	**BesN,**	2200	109	—		—
AlCU	—	субл.	180,1	112	[5	BeO	2550	85,4	4120	489,9	[3,4]
.'IIF	827	21,8	1402	155	2	BeSOa	1100	6 (разл.)			
AIP3	—	субл.	1272	318	[2]	BiBra	219	21,7	461	75	—
AIH3	>105 (разл.)		—	—		BiCl^	163	14,7	577	83,7	[2]
AII3	191	15,9	382	67		BiClg	233	23,6	439	74	
AIN	2227				[4]1	BiFa	727	25,96	1127	117,2	[^1
A1A	2046,5	113,0	2980	485.7	3]l	BIFB	151,4		230	62,3	[4[
AIPO4	2000	—					**407,7**	32	542 (разл.)	78	
	1100		1500 ( )азл.)			BiO	**902**	15,5	1647	226	13]
	1427	54,3	2067	276	[2]	Bi^Os					
AITIA	2205	71,2	3127	356	[2,3]	куб.	825	16,3	1890		[3]
AsBr3	31.2	11,8	221	41.8	[4]	моноклин.	817	62,8	1890		[3]
AsCls	- 1 6	10,1	130	38.1	—	BisSa	685	79',4	—	—	
ASF3	- 8 , 5	10,4	57,8	33,5	—		586	118.6	—	—	[7]
AsFs	- 7 9 , 8	11,5	- 5 2 , 8	—	[4]l		—33	—	20 (разл.	25.1	[4]
ASH3	- 1 1 6 , 9	1,2	- 6 2 , 5	16,7	[4ll	BrFs	8,8	12,03	126	42,7	
ASI3	141	21.8	371	56.5		BrF5	- 6 1 , 3	7,4	40,8	30,6	-
AцO,						CBr^	93,6	4,0	190	38	—
куб.	278	48,6	457	56.1	[3	**CCЬ**	—22,88	2,5	76,73	30,0	
моноклин.	314	45,2	465	96.3	[3	**CF4**	- 1 8 3 , 7	0,695	- 1 2 8 , 0	12,3	
октаэдр.	314	49,8	465	109,3	[3		(0,01 МПа)	(0,01 МПа)			
AsjSa	307	—	723	86	[2	**CI4**	171	—	разл.	—	—
AUCI3	288	12,98	—	—	2	C2N2	- 3 4 , 4	8.1	- 2 1 , 2	23,3	—
AuF	577	12,1	1200	142,0	2	CNI	—	субл.	139,8	59,4	5]
AuZn	760	24,6	—	—	5	CO	—205,02	0,8386	- 1 9 1 , 5 0	6,044	[3]
	- 4 6	—	89,8	29,7		CO,	—	субл.	- 7 8 , 5 1 5	25,23	[3]
Bfi	2450	104,7	>3500	—	[3	**C362**	- 1 1 1 , 3	—	7,0	25	[4]
BCl3	- 1 0 7 , 2	6,8	12,5	23,9	4	COS	—138,2	4,73	—50,2	18,51	
BjCU	—92,9	10,8	65,5	33,6	[4	COSe	—124,4		- 2 1 , 7	22,6	[4]
	- 1 2 8	4,6	- 1 0 0	17,1		CP	- П О	10,9			[4]
№	- 1 6 5 , 6	4,5	- 9 2 , 5	14,3	[4]	CSa	—111,9	4,39	46,24	26,78	
	- 1 2 1	—	18	25,5	—	**CSSe**	—85		84,5	31,62	[4]
B5H,	48,8	—	60,0	28,9	—	CSe^	- 4 5 , 5		125	33	
В Л	99,5	32,7	213	44	[2]	Cав:	2235				[7]
Bl3	49,9	—	209,5	41,8	—	CaBr,	742	29,1	1830	212	
BN(a-)	3000		5067		[7]	CaC/	2300	32,2			m

Вещество	'пл		'кип. 'субл	АЯкип- Д^субл	Литература	Вещество	'пл		"^субл	Д'^субл	Литература
CaCOз арагонит (кальцит, гекс. разл.)	50	0,19	—	—	[2]						
						CrCЬOr	824 —96,5	37 –	1330 116,7	198 35,9	4
CaCl2	772	28,0	1960	225		CrF,	894	19	1820	251,2	2
CaF,	1418	29,7	2530	305		CrFs	1100	41,8	1425	201	2
Can',	814	21	1000 (разл.)		–	CrF^O	31,6	23,4			A
Cal2	783	41,8	1760	179	–	CrOз	187	25,5	727 (разл.)		3
CaMe{COз)2	750 (разл)			–	–		2234 1565	104,7 –	3000 –		3 17
CaMg(Si03)2	1392	128	–	–	–	CsBr	638	23,6	1290	148	–
CaMoo4	1450	–	–	–	–	CsCl	645	20,3	1300	138	–
CagN^	1195	–	–	–	–	**Cs^CrOi**	975	36,0	–	–	–
Ca(KзЬ	140 (взп.)		–	–	–	CsF	703	21,7	1250	123	
Ca(NO,)2	561	21,3	разл.		[4]	CsH	682	10,26	1252		[2]
CaO	2630	52	3500	625,3	[3]	CsI	632	26	1280	133	
CaOa-SHaO	200	–	250 (взр.)			Csia	215	25,1	разл.	–	
Ca{OHЬ	580	–	–		–	CsNQg	409	13,8	–	–	
	984	82,9	–	–	–	**CsOs**	560	20	>597 (разл.)		[3]
	1358	100,8		–	–	CS20	490	19,2	495 (разл.)		[4]
	2525	67	–	–	[71	C s A	594	22	650 (разл.)		[4]
CaS04	1460	28	–	–	–	CsOH	343	4,6	–	–	–
CaSiOg	1544	–	–	–	–	**CSSO4**	1015	36	–	–	–
CaTiOa	1960	–	–	–	–	CuBr	489	7,2	1355	68,2	–
CaW04	1580	–	–	–	–	CuBr^	498	–	–	–	–
CrZrOs	2350	–	–	–	–	CuCl	430	10,2	1212	151	[2]
CdjAsa	721	74,1	–	–	[6]	CuCIa	596	–	–	–	
CdBr	565	20,9	863	–	[2]	CUF/	770	73,3	1387	150,7	[2]
CdBr^	568	33	865	102,5		CuI	602	10,88	1320	130,2	2, 6
CdCb	568	31,8	964	121	–	CuO	1336	37,3 (разл.)			3
CdFa	1072	22,6	1747	225,2	[2]	CUoO	1242	64,23 1 1800 (разл.)			3
Cdia	388	20,7	796	122,7	[2]	CuS	1100	316,1 (разл.)			2
Cd(N03)2-4H20	59,4	32,6	132	—		Cu^S	1129	11,3			
CdO		субл.	1559	225	[5]	CUS04-5H20	250				–
CdS	–	субл.	1380	213,5	[2]		1113	18,0		–	[6]
CdS04	1135	–	–	–	–	**g - e f**	-87,63	2,402	—66,85	17,82	[4]
CdSe	1252	45,2	–	–	f6]	DCl	-114,7	1,908	-84,75	–	[4]
CdTe	1092	57,4	–	–	f6]	DF	-83,6	–	18,36	–	[4]
CeBe	2190	–	–	.—	–	DI	-51,82	2,863	—36,2	19,72	[4]
CeBrз	732	–	1705	188,5	[4]	**D^O**	3,813	6,314	101,43	45,43	3
CfC,	2250	–	–	–			1.5	–	25,0	52,38	3
CeCl3	822	54	1650	199	–	ПуBrз	881	38	1085	199	2
	1432	58.5	2180	274,1	–	DyCIs	653		1539	187	—
a o	2600	80		565,2	[3]	DyFs	1160	58,6	>2200		
Ce,Oз	1920	83,7	3227	339,9	[3]	Dyl3	983	41,9	1320	172	
CIF	—155,6	–	-100,1	22		OУrOз	2385				[3]
CIF3	—76,31	7,612	11,76	27,53	–	ErBrз	950	41,9	1460	179,6	[21
CIFO2	-115	–	- 6	29,5	[4]	ErFa	1146	27,5	2200	–	
CIFO3	-147,7	3,83	-46,67	19,33	14]		1015	41,9	1280	167	[2]
ClO2	-59,8 (взр.)		9,7 (взр.)	26,33	[3]	**EuBr^**	683	25,12	1880	218	[2]
Cl2O	-116 (взр.)		2,2 (взр.)	25,96	[31	EuCla	854	23	2060	246	–
C I A	-90 (взр.)		78,8(взр.)	32,4	[3]	EuF^	1416	–	>2400	–	–
CoBr,	678	–	927	–	–	EUF3	1276	–	2280	–	–
CoCU	740	38	1053	145	[4]	Hub	580	21	1775	167	[2
CoF,	1202	30,1	1400	200,9	[2]	F,0	-223,85		-145,05	11,10	3
Col,	515		570 (разл.)			F2O2	—163,4				
CoO	1810	50,24	2627	255,4	[3]	**f1b**	1650				***T***
Co2P	1386	–			[7]	FeBrg	688	54	968	125	
Cos	1100	–		–		PeBrз	297	–	627	–	–
CoSO4	1089	–	–	–	[2]	EeCOз	>490 (разл.)		–	–	–
CoSi	1400	67	–	–	12]	Fe(C0)5	-21	13,2	105	40,2	–
CoSi,	1327	100,2			[7]	**Fe^CaOi**	1220	108			
Co,Si	1332	64,05				Feb,	677	43,0	1012	125	
CoaSiOa	1415				[7]	FeCl3	307,5	38	315	30	
CrB	2070					**FeF^**	1102	33,5	1827	208,3	[2, 4J
CrзC,	1895	–	3800	–	**F]**	**FeF3**	1027	50,2	1327	167,5	[2]

'пл		'кип-'субл	А^субл	Литература
-70,2		-30	25,5	[4-, 5]
594	**ТЪ**	935	111,9	[4]ц
1374	31,4	2512	230,3	[3]I
1Ж9 (пяя.п ^				f3]F
1350	—	—	—	3
1583	138,16	2623 (разл.)		31
1193	32,4	—	—	7]
1700				
64		300		
1405	**69**		-	-
1217	**92**			
1238	**97,1**			[6
121	**11,72**	279	43,55	2
164	**16,8**	535	**79,6**	2
78	**11,5**	201	**62,8**	2
	субл.	952	188,4	2]
		139 (разл		
—21,4		345		
212	**22**	727	83,74	[3]
652	35,6	2627	314	[3]
1725	92			
1110				16
960	**38,9**			
835	**52,8**			[2
785	**33,5**	1490	—	
605	40,5	1600	203,8	
926	41,9	1340	167	
2322				
26,1	12,14	186,8	41	2
-49,5		83,1	33	
112	21,8	1552	180	I2I
	субл.	—36,6	31	
—f65,8	**0,84**	-88,5	14,06	
—109		31	24,7	
-105,6		110,5	29	
—71		75,3	33,5	I4I
144		**440 (раз^**		
	субл.	**710**	209,3	f3
1086	43,96	>2352	255,4	[3
1116	17,2	2352	255	f3
665	**21**			f4
670	**32,6**	разл.		[6
236				
—86,9	2,406	—66,8	17,61	**[4]**
-13,3	**8,41**	**25,65**	25,2	
-114,2	**2,0**	**—85,08**	16,2	
-101	6,93	25		
		(3 кПа)	(3 кПа)	
	—	100,85	44,67	I3I
			(25	
—88,36	3,929	19,52	7,49	
—50,8	2,871	—35,4	19,77	
ПО				
70				-
-80	—	36	29,7	—
—41,6	10,5	83	30,14	[2]
0,00	6,013	100,00	40,683	13
-0,42	12,51	152,0	**51,6**	[3]
			(25 °С)	
26,5	13,0	>50 (pas		—
70,1	12,85	—	1 -	I4I
42,35	13,0	213 (разл.)		
61	9,2			
—85,6	2,38	—60,35	18,7	_

Вещество	'пл		'кип-'суСл	^^кип-^«суСл	Литература
	—89,5	7,5	70,7	35,1	[4, 5]
H,S04	10,31	10,7	279,6 (разл.)		
H^SOi-H^O	8,48	19,5	290	1 —	
H,Se	—65,7	2,515	-41,4	19,9	
H,Se04	62,4	14,4	>65 (разл.)		–
HTO	—	—	100,8	**46,89**	[3]
				(25 X)	
НДе	-51	4,2	—2	**23**	—
H2WO4	>100				
	29,0	14,2	118	40,2	
ж г - ' -		субл.	322	100,4	
HfC	3890	—	5400		7]
HfCl^	727	24,7	1475	147	[2]
HfClj	—	субл.	315	103	
HfFa	1377	20,9	2030	203	[2]
		субл.	974	226	
HfN	3000				
HfO„	2780	71			
HgBr,	238	17,9	319	59	**1**
№		субл.	392,5	—	—
	229		360		
HgCb	280	19,2	302	57,8	
Hg.ci,	—	субл.	383,7		
HgFa	645	23,03	647	92,1	[2]
	570	—	разл.	—	—
Hgl2	256	18,8	353	60	
HgO (крас-	500 (разл.)				[3]
					Z
HgS	825	1 —			
HgS04	>550 (разл.)				—
HoBr3	919	50,2	1336	—	—
HoCl,	720	30,4	1517	190	—
HoF3	1140	56,3	2200	—	—
Ho13	989	41,9	1300	172	[2]
IBr	42	—	119 (разл)		
ICl	27,2	11,1	98 (разл.)		—
IF5	9,4	15,9	100	41,3	**[1]**
IF,	—	субл.	3,4	30,7	[3]
1,04	130	—	—	—	**31**
InBr	220	24	680	92	[4]
InBr,	235	—	633	82,4	[4]
inBr3	—	субл.	409	123	–
InCl	225	9	590	97	—
InCk	235	14,65	523	92,1	[2]
InCla	—	субл.	500	170	
InF	452	13,4	900	109	(21
InFs	1170	46,1	1377	163,3	[21
Inl	351	22	713	85	
	210	20	447	95	
IS	1052	16,75	1727	251,2	[31
InjO	327	18,84	527	67	[31
	1910	83,74	3327	356	[3]
rnf"	692		850		
In^Ss	—	субл.	850	–	
ln,Ses	**890**	64	—	—	***B*** [6]
	670	**81,6**			**‖**
	442	**28,1**	**687**	**100**	
IrF^	1107	**9,63**	**1730**	**184**	
IrF,	44,1	5,0	53,6	30,5	
Ir02	>1100 (разл.)		—	—	[3]
Ir^O,	1177	41,87	1977	209,3	[31
KBF4	570	18,0	–	—	—
KBr	734	25,5	1407	149	

			'кип- ^субл		
KBrJ	58		(разл.)		
KCN	623	14,6			
IS"	900	27,9			
	776		1430'		
	357	21'			
KC103	973	33,0			
K2CГ04	857	29,4	1505 172		
KF	238,7	**6,62**	>400 (разл.)		
KHF^	**222**	18	разл.		
KHSO4.	252,6				
		24,0	1340 138		
KMП04	>200 (разл.)				
KM004		39	1400 (разл.)		
KN02		17	разл. –		
KNo3	334,5	9,80	>400 ((разл.)		
KNaC4H406-4H20	75		215 1 -		
©		20,52	543 (разл.)		
	707	28,5	разл.		
K2O.	490	29,31	1527 188,4		
	430	25,54	700 104,7		
	405	9,4	1320 129		
	813	18,4	1320 –		
K^Ю	1640				
KReo1	553	32	1367 -		
	948	16,2			
к ё к	177,0	10	500 (раз7.)		
K2S04	1069		1700		
K2Se04	1020	36,8			
	1045				
	522	^, 2			
K2WO4		31,0			
KrPr					
LaB					
LaBrg	783	33,5	1580 202		[2. 4] [7]
LaCfs		54.4	1710 209		
LaF3	1493	41,8	2330 234		
LaI3	779	33.5	1580 167		
La,(Mo04)3	1015				
La^Oa	2217	75,4	4200		
			-		
	1150 (рам.)				
	849	33,9			
U j B A	920	120			
	550	17,7	1290 107		
u g o .	732	38			
	610	19,7	1382 121		
LiClOs	129		300 (разл.)		
LiClOi	246,7	17.0	400 (разл.)		
UP	849	27.1	1681 147		
Li^GeOa	1239				
LiH		22	1680 213,5		
LiI		14,6	1170 97		
Li^MoOi	703	49,0			
	813		**z**		
	375				
LiNOe	253,0	25.5	>600 (разл.)		
Li^O	1727	58.6	2600 I 234,5		
LiOH	473	**20.1**	925 (разл.)		
	1220				
	1370				
Li,S04					

	'пл		•кип' 'оубл	'кип- ^субл	
Li^SiOa	1201	28	-	-	—
LbWO^	740	28,5	–	–	–
LUCl3	925	–	1420	121	-
LuFa	1184	30,2	2200	—	—
LUI3	1045	46,0	1200	201	[2,
Lu^Oa	2467	-	-	–	[3]
MgAl204	2115	–	–	–	–
M83(BO3)2	1410	–	–	–	–
MgBr^	711	39	1230	151	(41
MgCOa	500 (разл.)		–	–	-
MgCl,	714	43,1	1370	166	–
MgCr,04	2350	-	–	-	-
MgF,	1263	58	2270	274	–
Mgl2	633	26	1014	151	-
MgO	2825	77,5	3600	544,3	[3]
Mg(OH),	350	–	–	-	
Mg,P20,	1395	134	—	–	-
MgS04	1137	15	—	–	–
MgsSb^	1250	–	—	–	-
Mg,Si	1085	85,83	–	–	[7]
Mg2Si04	1890	66,1	—	—	–
MgW04	1360	–	—	–	–
MnAs	936	–	—	–	–
MnBr	1988	–	—	-	[7]
MnBra	698	–	–	–	–
MnClg	650	37,7	1238	148	–
MnFa	860	14	1640	256	–
MnF4	387	23,8	412	67	|2]
Mnia	638	–	–	–	–
MnO	1842	43,96	3127 (разл.)		[3]
МПО2	847 (раЗЛ.)		–	–	[3J
МП2О3	1347 (разл.)		-	–	[3]
Mn,0,	5,9	–	>55 (разл.)		–
a-Мпа04	1590	138	2630	314	[2]
P-МПЗО4	1560	127,7	2627	314	[3]
MnOэP	- 3 8	.	60	34	[4]
MnP	1147	–	–	–	[7]
MnS	1530	26,1	-	-	[7]
MnS04	700	.	850 (разл.)		—
MnSi	1275	59,4	—	—	[7]
MnSiOs	1323	34,3	–	–	[4]
MnTiOa	1404	33,5	—	—	

Продолжение табл. 12.12

'пл	ДЯдд.	'кип-'субл		Литература	Вещество	'пл	ДЯдл	'кип. 'субл		Литература
2550	—	—	—	[7]	Na2Cr04	794	24,7	—	—	
2350 (разл.)		—	—	[7]	NaF	996	33,5	1704	177	[41
2600	—	—	—	*m*	NaH	200 (разл.)		—	—	[2]
2522	—	—	—	[7]	NaHSOi	186	10,4	—	—	
194	18	269	54	—	Nal	661	23,7	1304	1597	[4]
97	31,4	617	83,7	[2]	NalOs	422	23,7	—	—	
17,6	4,3	33,9	27,2	-	KarMoOa	688	22	—	—	—
97,2	3,5	186	50	—	NaNHg	208	—	400	—	—
1927	67	1977 (разл.)		[3]	NaNO^	284	14,9	>320 (разл.)		—
801	49,0	1257	138	[3]	NaNOg	306,5	15,1	380 (разл.)		—
2020	—	—	—	—	NaOj	552	26,0	1027	117	[2, 3]
	—	71 (взр.)		[5]	Na^O	920	29,7	1350	—	[3]
-206,8	0,398	—129,0	11,55	[4]		596	16,7	(разл.)	—	ГЗ]
—77,75	5,66	-33,41	23,33	-	NaOH	322	6,4	1378	144.3	[4]
1,54	12,66	113,5	41,6	t4]	NaTOg	628	17,3	—	—	—
169,6	6,40	210 (разл		—	KasIO4	1510	—	—	-	—
146,9	14,2	разл.	—	—	Na,PA	998	59	—	—	—
32	16	58	47,7	[4]	Na^S	1168	30,1	—	—	—
149,6	—	170 (разл		—	NaSCN	307,5	—	—	—	—
-163,7	2,30	—151,65	13,783	[3]	Na,S03	911	26	—	—	—
-91,0	6,544	—88,5	16,571	[3]	Na^SO^	884	24,3	890	24,07	[2]
-101	-	-40 (раз		—	NajSOi-lOH^O	32,4	79,0	разл.	-	-
-11,2	14,662	21	38,56	[3]	Na2S203-5H20	48,5	23,4	100	—	-
—	субл.	33	56,94	[3]						
-55,5	—	-2	—			402	40,8	460 (разл.)		—
—59 6	4	-5,8	25,1		NasSb	1010	77	—	—	[4]
-141		-14,3	25,7	—	Na^Se	875	—	—	—	-
-107	—	18	305	Г4]	Na^SiFs	846	99,6	—	—	—
-132,5	—	-59,9	19,2		Na^SiOa	1088	54	—	—	—
21	—	100 (взр.)		—	Na^Te	1035	14	—	—	—
-79	—	4,8	22,2	[4]	NaVOa	630	28,3	—	-	-
1526		—	—		Na^WOa	696	3Г	—	—	—
406	13,6	—	—	—	NbB2	3050	—	-	—	-
966	36	1434	—	—	NbBre	267,5	36	362	75,7	—
742	81	>1000 (разл.)		—	NbC	3613	—	4500	-	m
747	26,2	1392	128	[5]	NbCls	205	33,9	247,5	52,3	—
564	18	1497	156	f4]	NbFj	79,5	12,2	234,5	51,0	—
858	28,0	разл.			NbN	2300	-	-	—	[7]
801	28,2	1490	138	—	NbO	1940	67	—	—	[3]
263	**21,3**	—	—	—	NbOz	2080	67	3527	356	[31
					NbA	1490	103,3	2927	334,9	[3]
					NdBfj	683	33,5	1614	195,8	[2, 4]

Вещество	'пл		'кип 'субл	ДЯ Д'^субл	Литература
NdCa	2207				Г7l
NdClg	760	50,2	1620	209	
NdF,	1380	54,7	2300	259	[2]
Ndl3	787	33,5	1350	172	[2]
NdoO,	2212	92,1	3000	—	31
NiBr'		субл.	919	224,6	
	—19,3	13,8	42,3	29,8	
			970	225	
NIF2	пет		1877	230	[2]
Nil,	797		—		
NiO	1957	50,7	—·	—	[3]
Ni{OH)2	230	—	—	—	
Ni,P	1110	—	—	—	
NiS	996	44.1			Г4l
NiSOi	840 (разл.)				
NiSb	1160	—	1400 (разл.)		
Ni,Si	1318	50,24	—	—	4
NpCls	802	41,9	1530	167	2
NpCl!	538	46,1	847	117	2
NPF/	827	50,2	1477	192,6	2]
NpFe	54,8	17,5	55,9	29,5	
N M	2560	62,8			[3]
Оз	-192,5	2,09	—111,9	157193	[3]
OsCU	97	13,8	330	50	2]
OsFa	1080	15,9	1630	213	[2]
OsFg	33,4	7	47,5	27,6	8]
OSO4 (желтый)	39,50	14,28	130	37,3	31
PBr	-40,5		173,3	38,7	
PCIз	-90,3	4,52	75,3	30,5	[4]
PF3	-151,3	0,94	—101,4	14,6	
PFs	-93,7	11,9	-84,55	17,2	
PHз	-133,8	1,13	—87,42	14,6	
PH4CI		субл.	—28	·	
PH4I	18^	—	80	—	
PI3	61,0		227	43,9	4
(PNCl2)3	114	20,9	2&5	55,2	4
	27,8	21,8	50,9	31,8	4
	23,9	14,07	175,4	18,84	3
PO4		**субл.**	100		3
P2O5					
гекс.		субл.	359	65	
ромб.	420	-65	584	79,13	[3]
(P20в)п	562	—	588	—	[3]l
POBr,	55.7		192	45,6	
POCIз	1,2	13,1	107,2	34,5	
POFз		субл.	-39,5	37,7	
	172		407		
Г й с , ,	-40,8		125	63,2	
PaCls	301	39,4	380	63	[2,41
PaF3	1280	36,8	2280	251	[2
PaFs	297	28,5	587	83,7	[2]
P a A	1777	108,9	3077	398	[3
PbBro	370	21	893	118	
PbCl,	495	24	953	129	
PbCU,		10,0	127	34,3	[2]
взр. около lOOT					
PbF,	822	11,9	1292	160,2	
Pbl,	412	21	872	100	
PbMoOi	1070		—	—	
PbO	886	25,52	1472	214	[31
PbOg	290 (разл.)				[3]

Вещество	'пл	^^пл	'кип. 'субл		Литература
PЬз04	830	—	—	—	[31
PЬ(OH)2	145	—	—	—	
PbS	1077	36,4	1281	229,4	[2
PbS04	1087	40,2	—	—	[4
PbSe	1065	49,4	—	—	[6
PbTe	917	57,4			[6
PbWOi	1125				
PdCL	678	40,6	1030	126	[2]l
PdF,	952	27,6	1730	180	[2]l
Pdl,	350 (разл.)		—	—	
PdO	877 (разл.)		—	—	[31
PdS	950 (ргзл.)		—	—	
PdSe^	1000		—	—	
PтBrз	687	33,5	1520	188	[2]l
PoCl	294	21,8	480	79,6	[2]l
PoCl2	—	субл.	195	—	
PoO„	552	23	разл.	—	
PrBrз	693	47,3	1695	167	
Pre,	2120	—	2500 (разл.)		[71
PrCIз	786	50,6	1630	213	
PrFs	1370	33,5	2330	259,6	[2J1
Pf2O3	2127	92,1	3727	376,8	[3]l
PtCIs	435	—	разл.	—	
PtF3	852	37,3	1200	159	[21
PtFe	61,3	5	69,2	30	
PtO®	450	19,26	477 (разл.)		31
PtPg	>1500				71
PиBrз	681	51	1512	184	41
PuCl3	765	56	1770	195,6	[4]l
PuCl4	457	39,8	790	126	[2]l
PuF,	1410	54	2280	259	2
PnPз	1426	33	—	—	4
PUF4	1037	58,6	1427	197	2
PuF,	51,6	18,7	62,2	30,1	
PUI3	777	50,2			[21
PuO	1017	30,14	2052	196^8	[3
PuOo	2390	62,8	3327	376,8	[3
PuoOQ	2085	67'	2977	314	[3
RaBr,	728		900		
RaClz	900	25,1	1610	176	12]
RaF^	1330	12,6	1930	230	[21
RbBr	692	23,3	1352	141,8	[41
RbCl	723	**23,7**	1390	149	
Rb.CC,	835	**29**	разл.		
	795	25,8	1430	159	
Rbl	656	22,0	1327	135	
RbNOa	312	4,6			
	412	17,2	567 (разл.)		[3]l
RboOo	570	30,5	1010 (рг13Л.)		[3:1
RbOH	385	8,9	—		
Rb,S04	1070	38,4	1700		
ReCls	660	50,2	830	ИЗ	[21
ReCU	278	37,7	330	58,6	[2]
ReCljO	4,5	—	131	—	
ReF4	125	30,1	500 (разл.)		[2]
ReF.	18,8	4,6	33,7	28,3	
ReOj	1202	50,2	2977	334,9	[3
ReOs	160	21,8	620		[3
ReOi	147	17,58	187	38,94	[3
ReaO,	301,5	66,2	359	69,9	3
RhCl^	780	26,4	960 (разл.)		2
RhFs	1187	46,0	1427	167,5	2

Вещество	'пл	Д^пл	'кип. субл	'^^оубл	Литература
	1115 (разл.)		—	—	[3]
И	>500 (разл.)				
RbF,	101	188,4	227	56	*(2l*
RUO4	25,4	10,89	100 (разл.)		[3J
RuS,	1000 (разл.)				
	—40	—	90	—	
SCl/	-123	—	59 (разл.)		
S.Cl,	-82	—	137 (разл.)		
SF,	-121,0	—	***-38***	21,8	
SF'	—	субл.	-63,6	22,8	[4]
S2F2	-165	—	-11	22,8	
SO.	-75,46	7,406	—10,01	24,95	[3]
a-SOq		субл.	62,2	30	
P-SO3	32,5	12,4	44,7	40,82	Г3]l
f-SOa	16,79	5.61	44,7	40,82	[3]l
SOBr^	-52	—	138	42,7	f4]
SOCl2	-104,5	—	75,6	31,8	
SOClF	-139,5	—	12,2	24,8	[4]
SOF,	-110,5	—	-43,8	21,8	
SOF,	-86,0	—	-35,1	21,8	[4]
SbBrg	96,6	15	289	51,2	
SbCl3	73,2	13	233	46	
SbCb	3,0	10,0	172 (разл.)		
SbFs	292	16,3	319	58,6	[2]l
SbFs	8,3	—	142,7	43	
SbH3	-94	—	-18	21	
Sbl,	170,5	18	401,6	61	
SbA	656	ПО	1456	37,35	[3
Sb,S3	560	65,3	1160	—	[3
Sb^Sej	612	77,4	—	—	6
	621	100,1	—	—	[6
	960	—	967	—	[4
ScjOj	2405	.96,3		—	3
Sc,(S04)3	973	—	—	—	
SeBr^O	41,6	—	разл.	—	
Sec,	45,5		125		
SeCls	956	67,4	975	157	
SeCl4	—	субл.	196	87,9	***12***l
SeF.	-9,5		107,7	47,02	[4]l
SeF,		субл.	—46,6	18,3	
SeO	1102	31,82	1802	188,4	[3']
SeO,	—	субл.	337	84,6	[3]
SeO,	118,5	7,1	>185 (разл.)		
SeOa,	10,8	4,23	117,6	42,7	
SiBr^	5,4	—	152,6	35	
SiC	2540		2830 (разл.)		[7]
SiCl4	—68,9	7,7	57.0	28,6	
	-1,0	—	145	42	[4]
I F '	—	субл.	—95,25	15,4	
SiH4	-185	0,67	-111,9	12,4	
SkB,	-131		-14,5	21,3	
sido	-84,3		108	34.3	5]
SiH,F,	-122	4	—77,8	16,3	4]
Sil4	120,5		301	50,2	4]
Si3N4		субл.	1900		
SiO	2277	50,24	—		[3l
SiO,:					
кварц	1610	8,541	1997 (разл.)		[3]
кристобалит	1720	7,704	2950	573,6 (25° С)	**[3]**

Вещество	'пл		'субл	Д^субл	Литература
тридимит	1680	9,002	—		[3
	1090		ИЗО	—	[2
IX	669	25,12	1880		[2
3TBrз	664	—	1645	19^9	[4
SmClg	858	14	1950	218	
SmCls	678	33,5	1560	197	2
SmFa	1400	33,5	2330	259	2
Sml2	520	21	1660	167	2
SmgOs	2320	83,74	3527	340	3
	1900	—			7
SnBr'	232	7	641	97	
8ПВГ4	30	**II**	208	37	
SnBr^Ig	50		225		
SnClf,	247	12,6	670	71	
SnCl4	—33	9,16	112	37	4
SnP,	212	13,8	853	113	2
SnFj	447	***27,6***	705	92,1	2
SnH4	-150		51,8	19,05	4
	320	12,6	718	105	4
Sn14	144,5	19,2	348,6	50	
SnO	,1042	26,8	1527	251,2	[3]
SnOa	1625	47,7	2500	314	[2. 3]
SnS	881	31,6	1276	156	
SnSOi				—	
SnTe			**разл.**		f6Г
SrBe	2235		**5100**		***17***l
SrB?,	657	10,1	1970	230	
SrC^	>1700	—			
SrCla	874	16,1	2040	243	
SrF,	1477	28,5	2460	324	
	538	19,7	1900	194	
L(N03)s	645	49		—	
SrO	2415	69,9	3000	534,2	[3l
SrS	>2000				***17***l
SrS04	1605	—		—	
SrSe	1600	—	—	—	
SrSiOs	1580				
SrTe	1490	57			
SrWOi	1535 (разл.)				
T,0	4,49	—	101,6	46,05 (25° С)	[3l
					4]
TaBrв	265	45,6	348,8	62,3	7]l
TaC	3985	—	5500		[2l
TaCl^	937	28,5	1377	167	
TaCls	216.5	34	236	56,1	
TaFs	96	12,6	229,2	51,9	
	365	6,7	543	75,8	[4,51
A	3087 (разл.)				***m***
Ta^Ов!					
ромб.	1785	67	2227		[3]
триклин.	1872	67	2227	—	[3
TbCIs	588				4
TCCIB	152	***32J***	232	50,2	2
TcFe	36	9,6	57	27,6	2
TCO'	2127	75,4	3727	439,6	3
Tc,0,	120	47,5	311	58,8	3
TeBr4	380		421		
TeCl^	208	14,7	328	64,1	***m***
TeCl4	224	18,9	390	71,1	
TeF4	129,6	26,57	374,5	52,8	[4]
TeFe	—	субл.	-38,6	27	
TEO^	733	29,5	1257	205,2	[3]

Продолжение табл. 12.12

		'кип. 'субл	А^кип. ^^субл		
2190				m	u s.
679	34	857	140		
2635		5000			
770	61	921	12^		
1110	**18,8**	1650	270,3		
566	33,5	837	125		
1877	54,4	2977	272,1		
3050	90	4400	752,3		**Ж -**
1975					VO
2790					
38	12,9	231	44,4		
3257		4300			V^Ob
1035	37.7	1330	147		WB
730	20,9	960	124		WBrg
—24,1	10,0	136,3	35,7		WBr,
1227	50,2 субл.	1400 285,5	217,7	[2]	WBr^O WC
155	19.8	379,5			W.C
2950					WCls
1780	54,43	2700	563,2		WCL
1870	67	2927	(разл.)		WCI4O
(21.3	кПа)				WFs
					WFe
					WF4O
1830	110,5	3027			WO2
2130					**WO3**
2177		3327			W^Reg
1990	(разл.)				WSia
1780					XeFa
460	16,4		100		XeF4
269	18,4				XeFe
431	15,6		**101**		YBr®
322	13,9	840	94		
550	35.6	927	138		
579	30,3	600 (1кПа)	71,2		**IHLR**
717	51,9				YbBr^
441	14.7	«^ЗГ-	(разл.)		YbCla
206,5	9,5	433	(разл.)		YbF3
448	**12,6**	1180			Ybb
632	24				ZnBr,
945	41.9	1440			*ZnCh*
845					
1020	41,9	1260			ZnF,
2385					
730	46				ZnO
519	72	765	126	—	
2520		4370	–	[7	ZnS04
841	37,7	1780	197	[2]	ZnSe
590	50,0	792	138,2	[2]	
287	36	417	67,9	12]	
179	20,9	277	50,2	2]	ZrB
1495	37	2277	255	2]	z
1036	47,0	1417	200	2	Zr
348	46,9 субл.	527 56,5	75,4 47.7	2 —	ZrC " ZrCL
>250					ZrCl4
680		1750	-	-	ZrF4
520		769			
2477	58,62		—	13]	**I S**
2840	136,1	(разл.)	–	[3]	ZrO^
2462					ZrSiOa

'пл		'кип > 'субл	А"кип> А^суВл	Литература
1600				
2810		3900		
1000	33,5	1375	147	Г21
—20,5	9,6	153	36	
—78	9,6	126,7	34,7	
1127	54,4	1627	230	
19,5	4,2	48,0	43,9	
2050	—	—	—	[7
1830	62 8	3127	293,1	[3*
1545	***57***	2700		13
1970	100,5	3027	(разл.)	[3
680	65,15	2052	264	
2800	–			Г7l
295	17	392	58	
309		>400	(разл.)	
322	61	331	55,2	
2785	—	6000		[7i
2795	–	6000		***u*** 1
248	24	287	49	
283	8	340	61,5	
209,5	33	224	43	
107	18,8	250	48	I21
2,0	4,1	17,3	**25,9**	
106	8	185,9	**56**	
1570	48,15	1850	**(разл.)**	[3
1473	73,5	1670	**180**	[3
2987	-	–		15
2160				
140		—	51 (25°>C)	
114	–	–	64(25°C)	
46	–	76	–	
905	37,7	1324		[2]
721	31,5	1482	210	
1155	23,4	1502	184	[2
997	50,2	1300	172	[2
2430	84	4300		[3
673	25,1	1800		[2
702		2033	258	
1162	29,7	2200		
772	21	1330	155	Г21
394	15,7	670	109,6	
317	10,2	732	119	
875	41,8	1505	185	
446	17	624	(разл.)	
1975	—	разл.		
1193	163,2	–		
—	субл.	1182	250,2	[4,7]
>600	(разл.)	—		
1520	53,6	–	–	[6]
1511	–	–	–	
1300	65			
3050				
28,7	18,0	123	38,9	Г4l
–	субл.	355	108	
3530		5100		[7]
727	26,8	1387	147	[2]
–	субл.	333	103,1	
–	субл.	906	261	
–	субл.	418	120	
2980	—	—	–	[7i
2900	87,1	4300	639	[3]
2430				

Таблица 12.3. **Температура *t*, °С, и теплота плавления и кипения** ДН, **кДж/моль, органических соединений при нормальном давлении** 101 325 **Па. Обозначения те же, что в табл.** 10.2 [4,13]

		ДНпл	'кип> ^субл	ё	Вещество	'пл	ЛНпл	'кип, ЧуОл	i ˛ l˂
транс-Азобензол	68,5	24,7	293,0		Валериановая кисло-	—33,83	7,74	186,05	44,0
Азулен	99	19,08	234	55,84	та				
Акриловая кислота	13	11,1	141,6		Винилацетат	—93,2	—	73	34,4
Акронитрил	-83,5	–	77,3	32,6	Гексадекан	18,6	53,36	286,8	
Акролеин	—87,0		52,5	28,85	1,5-Гексадиен	—140,7		59,46	28,58
Ал.аиловый спирт	-129	–	97	39,96	Гексаметилбензол	166,5	20,59	265	53,85
Амиловый спирт	—79	9,795	137,3	–	Гексан	—95	13,03	68,95	28,85
трет-Амиловый спирт	**—8,6**	4,49	102,35		2-Гексанон	-57		128	34,5
Анетол	21.4	16,0	234,5	–	***транс/,*** 3, 5-Гексат-	—12	–	78,5	20,59
Анизол	—37,5	–	153,80	39,4	риен				
Анилин	—6,15	10,54	184,13	45,15	Гексафторэтан	-94	2,69	-79	16,15
Антрацен	216,041	28,8	340	–	Гексахлорбензол		субл.	322	
Ацетальдегид	—121	3,22	20,8	27,2	Гексахлорэтан [5]		субл.	184,4	51,0
Ацетамид	82.3	14,2	221	–	1-Гексен	—139,82	9,347	63,35	28,03
Ацетилен (этиц)		субл.	—84	21,3	!^1<с-2-Гексен	-139,82	–	67,87	29,12
Ацетил тиофен	10.4	15,0	213,9	47,5	**г^ис-3-Гексен**	—137,82	–	66,44	28,70
Ацетон	-95,4	5,72	56,2	29,09	**Гексиловый спирт**	—46,7	15,38	158	50,63
Ацетонитрил	-44,9	8,91	81,5	32,8	1-Гексин	-131,9		71,3	
Ацетофенон	19,75	16,65	202	38,8	Гептадекан	22,0	40,48	301,8	
Бензальдегид	—26		179,2	40,9	Гептан	-90,6	14,02	98,42	31,69
Бензил	95	19,4	347,0	–	1-Гептан	-119	12,40	**93,64**	
Бензиловый спирт	—15,3	8,97	205,4	50,46	**транс-2-Гептен**	—109,48		**98**	
Бензоил бромистый [141	**0,0**		218,5	–	**Гептиловый спирт**	-34,1	18,17	176	
Бензоил хлористый [141	—0,5		**197,2**	–	emop-Гептиловый **спирт**	-35,5	–	151,45	39,5
Бензол	5,51	9,837	80,099	30,76	**Гептилциклогексан**	-40,4	23,3	244	
Бензойная кислота	122,5	18,00	250,0	–	1-Гептин	-81	–	99,74	–
Бензонитрил	—14	9,08	190,7	45,80	Гидрокоричная кис-	101,5	17,7	279,8	–
Бензотрифторид	-29,11		102.3	–	лота				
а-Бензофенон	48.21	16^	305,9	–	Гидрохинон	173,5	–	285	–
Бромбензол	—30,82	10,63	156,06	36,40	Гликолевая кислота	80	8,4	78	8,8
Бромбутан	—112,4	9,241	101,6	32,53	Глицерин	20	18,47	290 (разл.)	
Бромметан	-93,6	5,98	3,56	23,90	Глицин	247,2	разл.)	–	–
1-Бромпропан	—109,8	6,53	71,0	29,9	**Дейтерометан, CD4**	—183,37	0,902	**-161,2**	8,276
2-Бромпропан		6,53	59,4	28,4	**г^мс-Декалин**	-43,0	9,489	**195,8**	42,72
Бромуксусная кислота	49.5		208	54	Декан	—29,7	28,71	174,1	–
Бромэтан	**—118,6**	5,9	38,40	26,82	1-Децен	—66,3	13,81	170,6	–
Бромэтилен	-139,54	23,0	15,80	25,9	Дециловая кислота	31,20	28,0	270	61,34
1.2-Бутадиен	—136,19	6,961	10,85	–	Дециловый спирт	7	–	229	–
1.3-Бутадиен (диви-	—108,9	7,985	—4.4	22.59	1, 4-Дибромбензол	87,5	20,0	220,4	–
нил)					1,2-Дибромбутан	—65,4	–	166	–
Бутадиии	—36,4		10,3		Дибромметан	-52,55	4,2	97	36,0
Бутан	—138,35	4,660	—0,50	22,39	1,2-Дибромпро11ан	—55,2	–	140	–
2-Бутанон	—86,9	8,48	79,53	32,8	1,2-Дибромэтан	9,79	10,94	131,36	36,2
1-Бутантиоль	—115,7	10,46	98,0	32,23	Дибутиловый эфир	-95,3	–	142,0	36,92
1-Бутен (бутилен)	—185,35	3,848	—6,3	21,92	Дивиниловый эфир	—101	7,95	28,35	26,2
Цыс-2-Бутен	—139,91	7,308	3,7	23,35	Диизоамиловый эфир		–	173,2	35,1
трене-2-Бутен	—105,55	9,757	0,88	22,76	Диизопропиловый	-85,9	11,24	68	29,2
1-Бутин	—125,7	6,031	8,1	24,52	эфир				
2-Бутин	-32,26	9,235	27		Диметиламин	—92,2	5,939	7,4	26,10
Бутилакрилат	—64,6		197,4		N, Л/-Диметиланилин	2,45	11,42	194,15	44,35
Бутиламин	—50,5		70	27,2	2,2-Диметилбутан	—99,87	0,579	49,74	26,30
Бутилбензол	—87,99		183,35		2,3-Диметилбутан	—128,53	0,801	58	27,28
Бутилвиниловый			**93,5**	**32,3**	2,2-Диметил-1-Бутен	—140,0	–	55,6	27,40
эфир					3,3-Диметил-1-Бутен	-115,2	10,95	41,2	25,65
Бутиловый спирт	—89,53	8,98	117,726	43,97	2,3-Диметил-2-Бутен	-74,28	6,452	73,2	29,64
emojo-Бутиловый	-114,7		98,5	43,56	2,2-Диметилгексан	—121,18	6,799	106,84	32 „3
спирт					2,5-Диметилгексан	-91,2	12,86	109,0	32,8
mppm-Бутиловый	25,5	6,79	**82,25**	39,97	2,2-Диметилгептан	— 113,0	8,95	130,5	34,8
спирт					1,1-Диметилгидразин	—57,2	10,07	62,5	35,0
Бутилпропионат	',6		144,5	39,6	Диметиловый эфир	-138,5	4,94	-23	21,51
Бутилформиат	—91,9	–	106,8	37,1	Диметилоксалат	49,5	21,0	163,3	30,58

Вещество	'пл		'су б л		Вещество	'пл	Аип	'кип, 'субл	< <
2,2-Диметилпентан	— 123,8	4,356	79,2	29,16	**Изобутиловый спирт [14]**	— 108,0		107,2	43,47
3,3-Диметилпентан	—134,5	7,067	86,1	29,64	Изобутилпропионат	-71,4	—	136,8	34,8
1,1-Диметилцикло-пентан	-69,8	10,79	87,8	30,29	Изобутилформиат	-95,8	—	98,4	33,85
1,1-Диметилцикло-гексан	-33,5	2,023	119,5	32,97	Изобутилхлорид [14]	-131,2	—	68,9	
цис-1 ,2-Диметилцик-логексан	—50,0	1,645	129.7	34.23	Изовалериановая кислота	—29,3	7,32	176,50	43,1
***транс-1,3*-Диметил-циклогексан**	—90,1	9,86	123,5	38,85	Изокротоновая кислота	**15,5**	9,12	169	—
цис-1,4-Диметилцик-логексан	—87,4	9,307	124,3	33,76	Изомасляная кислота	—46,1	5.0	153,2	41,1
1,2-Диметоксибензол	22,7	16,0	206,1	—	Изопентан	-159,9	5,156	27,85	24,59
Диметоксиметан	— 104,8	7,97	42,5	28,6	Изопрен	—145,95	4,83	34,07	25,82
1,4-Диоксан	11,8	12,84	101,5	35,8	Изопропилацетат	—73,4	—	88	33,1
ДиЛенил		18,6	255,2	47,95	Изопропиловый спирт	-89,5	5,37	82,4	40,48
Ди( )ениламин	^4,5	17,53	302	55,23	Инден	-1,8	—	182,44	
ДИ( )енилметан	25,2	18,4	264,3	—	Иодбензол	-31,33	9,75	188,4	40,80
Ди<)ениловый эфир	26,9	17,22	257,9	47,74	Иодметан	-66,4	—	42,4	26,14
1,2 Дифенилэтан	53	30,5	285		1-Иодпропан	— 101,3	—	102,4	—
Ди(|)Тордихлорметан (( )реон-12)	—158,2	4,14	-29,8	19,61	Иодэтан	-108	—	72,3	29,8
Лий|)Топуксусная кислота	— 1,1		134,2	—	Иприт	13.5		215	**I**
1,1-Дифтор-1-хлор-этан	— 130,8	2,69	-9,2	22,4	а-Камфора [14]	178,4	6,82	209,2	
Ьторхлорметан Ьреон-22)	-146,5	4,12	—40,8	20,22	Каприловая кислота	16,5	21,4	239,3	—
1,1 •Дифторэтан	— 117	—	-24,7	23,8	Каприновая кислота	31,5	—	270	
1,2-Дихлорбензол	—14	12,9	180,05	—	Капроновая кислота	-1,5	15,1	205	—
1,3-Д11Хлорбензол	—24,76	12,6	173,0	—	Карбонил бромистый	—	—	60	30,1
1,2-Дихлорбутан [14]	-80,4		124		Карбонил (Гористый	-114	—	-83,3	16,15
Дихлорметан	-95,1		40	28,0	Кетен	-134,1	7,53	-41	20,25
1,1-Дихлортолуол [И]	— 16,1	—	214,0	—	Коричная кислота	135	—	300,0	—
Дихлоруксусная кислота	10,8	7,65	194,4	42,7	Коричный спирт	34	—	275,5	—
1,1-Дихлорэтан	—96,98	7,870	**57,28**	**28,71**	орто-Крезол	30,9	—	191,0	46,94
1,2-Дихлорэтан	-35,36	8,837	83,47	31,45	жета-Крезол	11,5	—	202,2	49,38
1 1•Дихлорэтилен	— 122,1	6,51	37	26,4	пара-Крезол	34,8		201,9	49,53
г;мс-1,2-Дихлорэтилен	-80,5	7,205	60,3	30,23	а-Кротоновая кислота	71,6	13,0	180,5	
***транс-1,2*-Дихлор-этилен**	-50	11,98	47,5	28,88	орто-Ксилол	-25,18	13,60	144,41	36,82
Дихлорэтиловый эфир	-46,7	8,66	178,6	45,22	жета-Ксилол	—47,87	11,57	139,1	36,40
Диэтиламин	-48,0	—	55,5	28,83	пара-Ксилол	13,26	17,1	138,35	36,07
N, Л/-Пичтиланилни	-38,8	—	217,0	46,32	Кумол (изопропил-бензол)	—96,04	—	152,39	—
Д б л	-83,92	11,0	181,1		Маргариновая кислота	62,5	51,09	227	
Ди; а *С*	14]	-43	126	31,1	Масляная кислота	-5.26	11,07	163,25	42,01
Дш ! Г	-116,2	6^0	34,51	26,60	Ментол	43	12,3	216	50,42
Дж	-40,6		186.1	41,58	Метакриловая кислота	16	—	162,5	—
Додекан	-9,6	36,84	216,3	—	Метан	—182,48	0,938	—164	8,18
1-Д одецен	—35,2	19,91	213,4		Метилакрилат	—	—	80,5	40,29
Додециловая кислота	43,75	36,6	302,3	57,49	Метиламин [5]	-93,5	0,134	-6,3	25,81
Додецилювый спирт [14]	24,0		259,0	—	3-Метиланилии	—30,4	3,89	203,35	45,61
.одецин	— 19	—	215	—	Метилацетат	-98,0		57	31,20
Изоамилацетат	—	—	143,6	37,7	2-Метил-1-бутен	-168,5	5,36	20	
Изоамиловый спирт	—	—	132	44,60	3-Метил-1-бутен	-133,7	7,912	38,57	25,50
Изоамилформиат	-93,5	—	123,2	35,8	Метил-трет-бутило-вый эфир	-108,6	—	55,1	28,3
Изобутан	-159,6	5,541	-11,73	21,3	Метилбутират	—84,8	—	102,5	34,42
Изо1бутилацетат	-98,6		116,2	36.7	Метилгидразин	-52,4	10,42	25,0	40,37
Изс)бутилбутират	-80,7		157,5	39,0	2-Метилгексан	—118,27	8,87	90,0	30,66
Изобутилен	-140,4	5,93	—6,9	22,1^	2-Метилгептан	— 109,0	10,25	117,6	33,6
					2-Метилгептиловый спирт	—112,0	—	175.4	—
					Метилизобутират [14]	—84,7	—	92,6	33,76
					Метилмеркаптан	—123	5,9	5,96	24.6
					Метилнитрат	-83,0	8,24	64,6	32,3
					Метиловый спирт	-93,9	3,17	64,96	35,27
					2-Метилпентан	-153,7	6,266	60,3	27,79
					2-Метил-1-пентен	-135,7	—	60,7	28,20
					2-Метил-2-пентен	—135,1	—	67,3	29,0

	'пл		'кип, 'субл	< <	Вещество	'пл	^"пл	'кип. 'субл	i t < <
2-Л11етил-2-пентилоВый спирт	-103	—	121.1	39,3	Пропиловый спирт	— 126,5	5,20	97,4	41,81
					Пропилпропионат	-75,9	—	122,3	35,6
Метилпропионат	-87,5	—	79,8	32,64	Пропилформиат	-92,9	—	81,3	31,93
Метилсилан	-156,8	—	-57,5	18,4	Пронин	-101,5	—	-23,2	23,27
3-Метилтиофен	-69,0	40,54	115,4	34,25	Пропионовая кислота	—20,8	7,53	141	30,62
Метилформиат	—99	6,7	31,5	27,89	Салициловая кислота [14]	159,5	—	256.0	
Метилциклогексан	—126,6	6,75	100,9	31,7					
Метилциклопентан	-142,4	6,23	71,8	29,3	Спиропентан	-107,0	6,435	39,0	33.39
2-Метил-3-этилпентан	-115,0	11,32	115,6	32,95	Стеариновая кислота	71	—	374	66,11
Миристиловая кислота	53,7	44,95	328	61.5	Стирол	-30,63	10,95	145,2	
					Тиобутан	—105,9	9,76	66,7	29,52
Мочевина (карбамид)	135	15,1 ,	154 (разл.)		2-Тиопентан	—113,0	9,91	95.5	32,08
Муравьиная кислота	8,4	12,68	100,7	22,26	2-Тиопропан	—98,39	7,99		
На{}талин	80,28	18,98	217,96	—	Тиофен	—38,3	5,09	84^2	31,47
1-Нафтол	96	23,47	288,0	72,27	Тетрабромметан	90,5	3,95	189,5	43,1
2-Нафтол	122	22,6	295	68,32	Тетрадекан	-5,9	45,07	253,7	
Неопентан	-16,55	3,256	9,50	22,75	1,2, 3,4-Тетраметилбензол	—6,25	7,046	205,0	**45,02**
орто-Нитроанилин	71,5	16,1	284,1	63,93					
жетс-Нитроанилин	114,0	23,7	305,7	65,93	1,2,4, 5-Тетраметилбензол	79,24	21,0	196,8	45,52
паро-Нитроанилин	149	22,2	313,7	77,4					
Нитробензол	5,85	12,12	211,03	—	2, 2, 3,3-Тетраметилбутан	—100,7	7,54	106,5	31,6
Нитроглицерин	13	21,9	256 (взр.)						
Нитрометан	-28,55	9,7	101,2	34	Тетраметилсилан	—99,0	6,90	26,6	24,2
3-Нитротолуол	15	13,7	231,9	50,17	Тетранитрометан	14,2	—	126	38,5
2-Нитрофенол	45,5	17,4	216	—	Тетрафторэтилен	-142,5	7,71	—76,3	16,82
Нонан	-51	15,47	150,8	37,76	Тетрахлорметан	—22,99	2,5	76,54	**30,0**
1-Нонен	-81,37		146,87		1,1,1, 2-Тетрахлорэтан	—70,21		130,5	**36,8**
1-Нониловый спирт	—5,5	—	213,5						
1-Нонин	—50	—	150,8		1, 1,2, 2-Тетрахлорэтан	-36	—	146,2	38,7
Октан	-56,79	20,74	125,66	34,57					
1-Октен	-101,73	15,31	121,3	—	Тетрахлорэтилен	—19,0	10,5	121,0	34,7
1-Октиловый спирт	16,7	—	194,45	53,1	Тетрафторметан	-183,7	0,70	— 129	12,33
2-Октиловый спирт	-31,6	—	180,8	51,5	Тетраэтилсвинец	-136,2	8,79	195 (разл.)	
1-Октин	-79,3	—	125,5	—	Тетраэтилсилан	-83,8	13,0	153,0	39,7
Олеиновая кислота	16,3	—	369	67,15	Толуол	—95,01	6,62	110,62	33,47
Пальмитиновая кислота	63	54,89	360	63.14	1,2, 2-Трибромбутан [14]	—		213,8	
Паральдегид	—12,6	13,8	128	—	Трибромметан	8,3	11,08	149,5	
Пентадекан	10,0	34,59	270,6	—	1, 2,3-Трибромпропан	16,9	—	222,2	—
Пентадеценовая кислота	52,5	43,1	15И	—	1,1, 2-Трибромэтан	-29,3		188,93	
					Тридекан	-5,4	25,50	235.4	
1,4-Пентадиен	—148,28	6,14	25,97	26,0	Тридекановая кислота	45	33,6	299,0	—
Пентан	-129,7	8,41	36,07	25,77	Триметиламин	-117,3	—	2,8	24,3
1-Пентантион	-75,7	17,49	126,6	37,02	1,2,4-Триметилбензол	-43,91	12,34	16,35	39,25
Пентафторхлорэтан	-106	1,878	-38	19,41	2,2,3-Триметилбутан	-24,19	22,01	80,88	28,95
Пентахлорэтан	-29,0	—	162	40,6	Триметилоксид	—97	6,49	46	—
1-Пентен	-138	5,81	30,0	25,20	2,2,3-Триметилпентан	— 112,3	8,63	109,8	32,2
Чис-2-Пентен	-151,4	7,11	36,9	—	Триметилсилан	-135,9	—	6,7	24,4
тракс-2-Пентен	—136	8,39	36,3	—	1,2,4-Трихлорбензол	17,05	15,48	213,0	
1-Пентин	-90,0		40,2	—	1,1,1 -Трихлорпропан	—77,7		108,2	
Перлагоновая кислота	15	20,3	254	—	Трихлоруксусная кислота	59,1	5,90	195,0	56,2
к-Пиколии	-66,7	9,82	129,6	37,77					
Пикриновая кислота	122,5	19,5	320	87,9	1,1,1-Трихлорэтан	-30,41	1,88	74,1	
Пиперидин	-9,0	—	106,5	32,3	1,1,2-Трихлорэтан	-30,5	11,38	113,77	36,8
Пиридин	-41,7	8,28	115,2	35,11	Трихлорэтилен	-73	—	87	32,13
Пирролидин	—59	8,58	86,6	33,01	Трифторбромметан	-143,2	—	—59	22,7
Пропадиен (аллеи)	-136		-34,5	20,92	Трифторметан (фреон-23)	-160		—82,2	18,4
Пропан	-189,7	2,52	-42,1	18,77					
1, 3-Пропандиол	-85,1	—	213,5	44,33	Трифторуксусная кислота	—15,3	—	72,4	34,7
Пропей (пропилен)	—185.2	3,00	—47,4	18,42					
Пропиламин	—83,0	—	47,8	29,05	Трифторхлорметан (фреон-13)	-181	—	—81.1	14,63
Пропилацетат	-95	—	101,8	34,74					
Пропилбутират	—97,2	_	142,7	37,2	1,1,1-Трифторэтан	—111,3	6,19	—47,31	19,8

продолжение табл. 12.3

Вещество	'лл	ДНпл	'кип, 'субл	11 К аз	Вещество	'пл	^«пл	'кип, 'субл	i t ag fT
Уксусная кислота	16,64	11,73	117,8	23,7	Циклогексен	-103,5	3,293	83	
Ундекан	-25,59	25,18	195,9		Циклогептан	-12	1,882	118,5	
а-Ундекановая кислота	28,6	25,1	280		Циклононан	9,7	19,3	178,4	40,5
					Циклооктан	14,3	2,410	149	
Уретан	48,5	15,2	187	—	**Циклопентан**	-93,9	0,609	49,3	27,2
Фенатрен	101	18,62	340	—	Циклопентанол	-19	1,54	140,8	—
Фенилгидразин	19,8	16,4	248	54	Циклопентен	-135,1	3,363	44,2	—
Фенилуксусная кислота	76,7	17,7	266,5	—	Циклопропан	-127,5	5,443	-32,7	20,5
					орто-Цимол	-71.54	—	178,15	—
Фенол	40.8	11,6	181,8	47,30	Щавелевая кислота	субл.		157	90,8
Формальдегид	—118		-19,3	23,3	Эйкозановая кислота	76,2	70,92		
Формамид	2,6	6,7	210 (разл.)		Энантовая кислота	—7,5	15,0	223	
Фосген	-127,8	5,69	7,56	24,40	Этан	-183,3	2,857	—88,63	14,70
Фторбензол	-41,2	11,30	85,1	31,20	Этандиаль	15	—	50,4	38
Фторбутан	-121,4	—	25,1	26,05	Этен (этилен)	—169,15	3,351	-103,71	13,54
Фтордихлорметан [5]	-135	—	9	24,0	Этилена окись	-112,5	5,173	10,5	25,53
Фторметан	-141,8	—	-78,4	17,56	Этиленгликоль	-11,5	11,6	198	57,03
Фтортрихлорметан (фреон-11)	-111	6,893	23,8	24,9	Этилеидиамин	8	19,3	117,4	38,9
					Этилакрилат	-71,2		99,8	
Фторхлорметан	—	—	-9,1	23,4	Этиламин	-81		16,6	27,30
	-138	—	-42	22,2	Л^-Этиланилин	-63,6		204.72	
Фторэган	-143,2	—	—37,7	21,07	Этилацетат	—83,578	10,98	77,06	32,26
Фторэтилен	-160,5	—	72,2	17,1	Этилбензол	-94,975	9,16	136,19	35,98
2-Фторэтиловый спирт	-26,45	—	103,5	43,9	Этилбутират	-100,8	—	121,55	36,7
Фуран	—85,6	3,80	31,4	27,04	Этилвиниловый эфир	—115,8		37,5	
Фурфуриловый спирт	-14,6	—	171	—	3-Этилгексан	—	—	118,53	33,60
Фурфурол	—38,7	—	161,5	—	Этилизобутират	—88,2	—	110,1	34,43
Хинолин	-15,2	10,79	236,6	47,35	Этилизовалерат [14]	-99,3	—	135,4	—
лта-Хлоранилин	—10,4	11,63	230,6	—	Этилмеркаптан	-147,9	4,975	35,0	26,78
Хлорацетилен	-126	—	-30	22,5	Этилметиловый эфир			7,5	24,73
Хлорбензол	-45,58	9,556	131,69	35,66	1-Этилнафталин	-13,9	16~3	258,7 (разл.)	
1-Хлор-1-бромбензол [14]	16,6	—	82,7	33,1	Этилнитрат	-94,6	8,527	87.7	33,9
					Этилнитрил	-44,9	8,91	81,5	32,75
1-Хлорбутан	-123,1	—	78,44	30,9	Этиловый спирт	-113,3	5,02	78,5	38,74
Хлорметан	-97,73	6,43	—24,2	21,63	3-Эгилпентан	-118,6	9,456	93,5	30,95
Хлороформ	-63,5	9,5	61,1	29,67	Этилпропиловый эфир	—	—	61,4	28,90
1-Хлорпентан	—99	—	107,8	—	Этилпропионаг	-73,9	12,6	99,1	34,42
1-Хлорпропан	**-122,8**	5,544	46,6	27,6	Этилсилан	-179,7	—	-13,7	22,3
Хлоруксусная кислота [5]	**61,2**	15,85	189,35	54	2-Этилтолуол	-80,83	10,63	165,15	38,87
					4-Этилфенат	47		219,0	
4-Хлорфенол	43,5	15,1	219,8	—	Этилформиат	-80,5	9,2	54,5	30,31
	—136,4	4,45	12,27	24,65	Этилхлорацетат	-26,0		141,3	41,4
Хлорэтилен	-153,8	4,74	-13,7	20,8	Этилцианид	-91,8	6,07	97,10	31,0
2-Хлор-1-этиловый спирт	-67,5	—	128	41,4	Этилциклогексан	-111,3	8,333	131,8	34,69
					Этилциклопентан	-138,4	6,896	103,5	32,17
Циклобутан	-50	1,088	12	24,19	Этин (ацетилен)	субл.		—84	21,3
Циклогексан	6,55	2,665	80,74	30,8	Янтарный ангидрид [14]	119,6	—	261,0	
Циклогексанол	25,2	1,70	161,4	42,4					

Таблица 12.4. Температура плавления полупроводниковых, оптических и высокотемпературных соединений, °С [30—35]. (См. также табл. 12.2)

Полупроводниковые и оптические соединения

AgFeSe,	574	AgGaTe^	717	AIAs	1597	As^Seg	360
			850	AIP	1500		362
AgFeTe^	387	Ag1n1e^	777	AISb	1054		1900
		AgltiTeg	677	AI^Ses	950	Ba^NaNb^OiB	1430
AgGaSe,	847	AgSbSe,	637		895	BaSrNbOe	1480
		AgSbTe^	557		807	BiSe	607

Продолжение табл. 12.11

'пл	Вещество	''пл	Вещество		Вещество	
707	InN	927	NboC	2927	CaCr	**2300**
1430	InP	1054	NbB4	2900	ThoS	**2300**
1560	InSb	525	a-SiC	2800	Th4S,	**2300**
1705	InSe	660	TiB^	2790	Y C /	**2300**
ПО	InTe	696	HfOa	2777	YB	**2300**
910	KH2PO4	255	W,B	2770	W2B5	**2300**
1430	KSb	**332**	**WgC**	2730	NbB	**2280**
621	KsSb	**812**	**UO2**	2730	UQ	**2250**
397	**LaTe^**	727	**w c**	2720	VB	**2250**
917	**LiNbOg**	1250	ZrO,	2700	**ScBs**	**2250**
787	LiTaOs	1650	ZrBi,	2680	**M03B2**	**2250**
740	Mg,Ge	1115	ThOa-ZrG»	2680	UB**L**	**2235**
456	Mg:Pb	650	YN	2670	SrBe	**2235**
460	Mg,Sn	778	ThQ	2656	Cав',	**2230**
<1200	NH4H2PO4	190	UN	2650	BaB.	**2230**
322	NaSb	192	ScN	2650	BP	**2227**
1125		1737	ThN	2630	BasN,	**2220**
1617	**PbMoOa**	1065	CaO	2600	ThB^	**2210**
1162	Pr^Ss	1827	BeO	2550	BaS	**2205**
655	SmS	902	SmBg	2540	BesNa	**2205**
574	**SnSe^**	657	NdBe	2540	BesNg	**2200**
467	**SrMoOa**	1065	LaBe	2530	CaO . ZrOg	2200
767	SnTe	790	Ta^Si	2510	Nd,S3	2200
697		1252	TaeSis	2500	CrB3	2200
932		1940	CeOj-ZrO-	2500		**2200**
987	**ZnAsa**	768	MgO	2500	TiSio	**2200**
697	**ZnGeASg**	602	UB4	2495	CeB.	**2190**
ИЗО	**ZnInjSei**	977	SrO	2460	WSi2	**2165**
555	**ZnIn^Tei**	802	CeO	2450	ZrSi	**2150**
527	ZnSb	546	***Сфз***	2440	ThBe	**2150**
837	***Высокотемпературные***		Tab	2430	**Mo^B**	**2140**
687	***соединения***		TaS	2425	**NdS**	**2140**
1111			ThS	2425	TisSig	**2120**
407	HfC	3890		2425	ThgNa	**2100**
1520	TaC	3880	**Nb^N**	2420	MoB,	2100
1227	ZrC	3530	**ZrOs-SiO,**	2420	GdBe	2100
1350	NbC	3480	Y2O3	2410		2100
712	Ta,C	3400	VB,	2400		**2077**
1020	HfB^	3250	A**lsl**	2400	V3B2	**2070**
790	TiN	3205		2400	CeaS^	**2050**
700	TiC	3147		2400	CrB	**2050**
450	TaB,	3100	UB,	2385	MoSia	**2030**
1147	TaN	3087	VN	2360	AL.P3	**2030**
740	NbB,	3000	MoB	2350	TiO	**2020**
725	BN	3000	UC	2350	Al^Og-BaO	**2000**
827	HfN	2982	Be^C	2325	BeO-ZrO,	2000
707	ZrN	2982	La^Os	2310	ALOo.BeO	**2000**
765	TiBj	2980	BeBe	2300	AlaOs-MgO	**1930**
655	ThOg	2956				
943						

Таблица **12.5. Температура плавления (солидус) t^, сталей и промышленных сплавов. Выделены значения ликвидуса, С**

Марка		Марка	'с	Марка	'с	Марка	
		Стали [24, 25, 26]					
Углеродистые	**1535**	X18H9, X23H18	**1410**	0X18H10	**1410**	X23H13	**1440**
X13, X25T, X28	**1500**	X18H9T	**1500**	X20H14C2	**1400**	4X10C2M	**1480**
X28Л, X34Л	1350	X18H10T	**1400**				

					'с	Марка			
				Бронзы [27 , ***28***\					
Бр. А5	1056	Кадмиевая	1040	Бр. ОС10-10	**925**	Бр. ОЦС5-5-5	**955**		
Бр. А7	1040	Бр. КМц3-1	970	Бр. ОС 12-7	**930**	Бр. ОЦС6-6-3	967		
Бр. АЮ	1040	Бр. КН1-3	1050	Бр. ОСН10-2-3	**1000**	Бр. ОЦС8-4-3	**1015**		
Бр. АЖ9-4	1040	Бр. КСЗ-4	1020	Бр. 0ф4-0,25	1060	Бр. ОЦСН3-7-5-1	**990**		
Бр. АЖМц10-3-1,5	1045	Бр. КЦ4-4	1000	Бр. ОЦ4-3	**1045**	Бр. СЗО	**975**		
Бр. АЖН10-4-4	1084	Бр. Мг 0,3	1076	Бр. ОЦ 8-4	854	Серебряная	1082		
Бр. АЖН11-6-6	**1135**	Бр. Мц 5	1007	Бр. ОЦ 10-2	1015	Бр. СН6О-2,5	885		
Бр. АЖС7-1.5-1,5	1020	Бр. 010	1020	Бр ОЦСЗ-12-5	**1000**	Бр. СуН7-2	**950**		
Бр. АМц 9-2	1060	Бр. ОС5-25	899	Бр. ОЦС 3,5-6-5	**980**	Бр. ХО, 5	1073		
Бр. Б2	864	Бр. ОС8-12	940	Бр. ОЦС4-4-2,5	887	Сплав ХОТ	1075		
Бр. Б2,5		Бр. ОС10-5		Бр. ОЦС4-4-17	**920**	Бр. Цр0,4	965		
				Латуни [24 , 27,					
		ЛА 67-2,5		ЛМц 58-2	**865**	Л065-1-2	**920**		
Л62		ЛА 77-2	930	ЛМцА 57-3-1	**920**	Л070-1	890		
Л63		ЛА 85-0,5	1020	ЛМцЖ 52-4-1	**940**	Л074-3	885		
Л66		ЛАЖ 60-1-1	904	ЛМц 55-3-1	**930**	Л090-1	995		
Л68		ЛАЖМц 66-6-3-2	899	ЛМцС 58-2-2	**900**	ЛС59-1	**900**		
Л70		ЛАН 59-3-2	892	ЛМцОС 58-2-2-2	**900**	ЛС60-1	**900**		
Л75		ЛАНКМц75-2-2,5--0,5-0,5	940	ЛН 56-3	**890**	ЛС63-3	885		
Л80		ЛЖМц 59-1-1		ЛН 65-5	**960**	ЛС64-2	**910**		
Л85		ЛК80-3		ЛО 59-1	885	ЛС74-3	**965**		
Л90	1025	ЛКС65-1,5-3		ЛО 60-1	885				
Л96	1055	ЛКС80-3-3		ЛО 62-1	885	–	-		
				Медно-никелевые сплавы [24 , 27,					
Алюмель	1430	Манганин		Нейзильбер	965	МН95-5	1086		
НМцАК2-2-1		МНМц 3-12		МНЦС 16-29-1,8		МНА13-3	**1120**		
Константан МНМц 40-1,5	1260	Мельхиор МНЖМц 30-1-1		Нихром Х20Н80	**1390**	МНЦС 17—18—1,8	**1120**		
Копель МНМц 43-0.5	1220	Мельхиор МН19	ИЗО	Ферр^нихром	**1230**	НК 0.2 НМ8	**1384** **1190**		
				Хромель Т НХ9,5	1435	НМ 56,6	**1290**		
Куниаль А		Монель НМЖМц		Хромель К НХ9	1435	НММц 3—12	960		
МНА 13-13		28-2,5-1,5		МНО,6 (ТП)	**1084**	НМц 2,5	1440		
Куниаль Б		Нейзильбер		МН5	**1120**	НМц 5	1370		
МНА6-1,5		МНЦ 15-20		МН16 (ТБ)	1120				
				Алюминиевые сплавы [24					
АВ (Авиаль)	543	АЛ 10В	488	АМг 7	550	В-95	477		
АК2	509	АМг	627	АМц	643	Д1	513		
АК8	638	АМгЗ	568	АН-2.5	640	Д16	502		
АЛ1	535	АМг5	638	АСМ	657	Д18П	510		
				Магниевые сплавы [27]					
ВМ65-1	516	МЛ4	400	МЛ9, МЛ 10	550	МА2			
МЛ1	505	МЛ5	430	МЛН	593	МАЗ			
МЛ2	645	МЛ6	440	МЛ15	539	МА5			
МЛЗ	561	МЛ7	505	МА1	645	МА8			
				Цинковые сплавы [25]					
ЦА15		ЦАМ 4-1		ЦАМ 10—2	419	ЦМ4			
ЦАМ2-4		ЦАМ 4-3		ЦАМ 10-5	395	ЦОС 3 - 3			
ЦАМ2-5		ЦАМ 8-2		ЦМ1	422				

Продолжение табл. 12.11

Марка		Марка		Марка	'с	Марка	'с
Типографские сплавы [27,							
Ли1. Ст2	240	Ми, Ш3, Нт	255	Ш2	270	Ш1	
Жи1, Мп1. У	245	МСМ1, П2	260	Гс. МШ3	300	К	
Припои [28, 29]							
ПМЦ 36	800	ПОССу 4-6	244	ПСр 1	225	ПСр3Кд	
ПМЦ 48	850	ПОССу 5-1	275	ПСр 1,5	265	ПСрЮ	
ПМЦ 54	876	ПОССу 10-2	268	ПСр 2	225	ПСр12М	
ПОС40Ч-ПОС90	183	ПОССу 40-2	185	ПСр 2,5	300	ПСр44	
ПОСЮ	268	ПОССу 18-0,5	183	ПСр 2,5С	304	ПСр65	
ПОСК 50-18	142	ПОССу 95-5	234	ПСр 3	314	ПСр72	
Б6	416	Б91			304	БН	
	370	Б93А			440	БС6	

Таблица 12.6. **Температура ия (солидус) tc двухкомпонентных сплавов, °С**

		Содержание компонента В, %								
↑	Sn	870	750		550		450	420	375	300
	Zti	850	755	705	690	660	630	610	570	505
↓	^	625	615	600	590	580	575	570	650	750
Al	Au	675	740	**800**	855	915	970	1025		
Al	Xu	630	600	560	540	580	610	755		1055
Al	Fe	860	1015	1110	1145	1145	1220	1315	1425	1500
Al	Sb	750	840	925	945	950	970	1000	1040	1010
Al	Sn	645	635	625	620	605	590	570	560	540
Al	Zn	640	620	600	580	560	530	510	475	425
Аи	Ag	1062	1061	1058	1054	1049	1039	1025	1006	982
Аи	Cu	910	890	895	905	925	975	1000	1025	1060
Аи	Pt	1125	1190	1250	1320	1380	1455	1530	1610	1685
Cd		420	520	610	700	760	805	850	895	910
Cd		300	285	270	**262**	258	245	230	210	235
Cd	Zn	280	270	295	313	327	340	355	370	390
Си		1035		945	910	870	830	788	814	875
Си		1180		1290	1320	1335	1380	1410	1430	1440
Си	Sn	1055		755	725	680	630	580	530	440
Си	Zn	1040	955	930	900	**880**	820	780	700	580
K	TI	133	165	188	205	215	220	240	280	305
Na	Bi	425	520	590	645	690	720	730	715	570
Na	Cd	125	185	245	285	325	330	340	360	390
Ni	Sn	1380	1290	1200	1235	1290	1305	1230	1060	800
Pb		460	545	590	**620**	650	705	775	840	905
Pb	**Й**	870	920	925	945	950	955	985	1005	1020
Pb	Na	360	420	400	370	330	290	200	200	130
Pb	Sb	250	275	330	395	440	490	250	560	600
Pb	Sn	295	276	262	240	220	190	525	200	216
Pb	TI	710	790	**880**	917	760	600	185	410	425
Sb		595	570	545	520	500	505	480	680	850
Sb	*Й!*	610	590	575	555	540	520	545	405	330
Sb	Sn	600	570	525	480	430	395	470	310	255
Sb	Zn	555	510	540	570	565	540	350	510	470
								525		

Таблица 12.7, Температура плавления (солидус) tc легкоплавких сплавов, [24, 37—39]

Сплав			
Hg97,2 Na2,8*i	-48,2	BiSO Pb2S Sn2S	93
Cs94,5 Na5.5*i	-30	BiSO Pb31.2 Snl8,8*§	94
Cs93 Na7«	-28	BiSO Sn2S Cd2S	95
K78 Na22«	—11,4	BiS2,S Pb32 Snl2,S	96
K80 Na20	-10	Bi47 Pb3S .3 Snl7,7	98
Rb91,8 Na8,2*i	— 4,S	Bi40 Pb20 Sn40	100
K70 NaSO	— 3,S	BiSO Pb40 SnlO	100
K60 Na40	S	BiSO Pb28 Sn22*e	100
K50 NaSO	11	Bi54.4 Pb2S,8 Snl9,8*	101
K90 NalO	17,5	Bi48 Pb28,S Snl4,S Hg9	105
Na56 K44*i	19	Bi42.1 Pb42,l Snl5,8	108
Na85,2 Hgl4,8*i	21,4	Bi40 Pb40 Sn20*'	113
Na60 K40	26	Bi36,S Pb36,S Sn27	117
Na70 K30	41	Bi33,4 Pb33.3 Sn33,3	123
NaSO HgSO	45	Bi55.S Pb44,S*i	124
Bi47,7 Inl9,l Sn8,3 СЬБ.3 Pb22,6«	47	BiS6,S Sn43,S*i	125
Bi36 Hg30 Pb 28Cd6	48	Bi27,2 Pb44,S Sn33,3	127
Bi42 Pb32 Hg20 Cd6	SO	Bi43 Pb43 Snl3	128
Hg70 Na30	SS	BiS6 Sn40 Zn4*i	130
Bi49,4 In21 Pbl8 Snll,6«	57	Bi28,5 Pb43 Sn28,5	132
NaSO K20	58	K90 TllO	133
Na60 Hg40	60	Hg70 K30	135
BiS3,5 Snl9 Pbl7 Hgl0,5	60	BiS7 Sn43*i	138
Na99 TII*i	64	BiS7 T143*i	139
BiSO.l Pb24,9 Snl4,6 Cdl0,8*2	65,S	Cdl8,2 Pb30,6 Sn51,2	142
Bi50,4 Pb2S.l Snl4,3 Cdl0,2*2	67,5	Pb42 Sn37	143
BiSO Pb2S Snl2,S Cdl2,S*2	68	Bi60 Cd40*i	144
BiSO.l Pb22,6 Snl3,3 CdlO*3	68	BiSO PbSO	145
Na70 Hg30	70	Bil9 Pb38 Sn43	148
Bi49,5 Pb27,27 Snl3,13 Cdl0.1*i	70	Bi25 PbSO Sn2S	149
Bi38,4 Pb30,8 SnlS,4 CdlS,4	71	Bil8,l Pb36,2 Sn45,7	ISI
Bi33,7 In6S,3*i	72	Bil6 Pb36 Sn48	155
Bi27,S Cd34,5 Pb27,5 SnlO,5	75	Bil3,7 Pb44,8 Sn41,5*i	160
BiSO Pb34,S Sn9,3 Cd6,2	77	BilO,S Pb42 Sn47.5	160
Na90 K10	77	Bil3.3 Pb46 Sn40,l	165
BiS8 Inl7 Sn2S«	79	K80 Tl20	165
Bi3S,3 Cd9,S Pb35,l 3пго,!	80	Bil2,8 Pb49 Sn38,2	172
Na80 Hg20	80	Pb32 Sn68	177
Na96,7 Au3,3*i	80	Cd32 Sn68*J	177
Na90 HglO	90	Na70 HgSO	181
NaSO HgSO	90	Sn62 Pb38*i	183
BiS5,2 РЬ33.3 1111.5*1	91	Bi44.**2** Pb9.**8 TI48*I**	186
BiSl.e Cd8,l РЬ40,3	91	Bi47,S T152,S*i	188
BiSO РЬЗО Sn20*«	92	Bi76,5 T 123,5*1	198

Эвтектический сплав.
Сплав Вуда.
Сплав Липовица.
** Сплав Лихтенберга.
Сплав Ньютона.
*• Сплав Розуа.
Висмутовый сплав.

Таблица 12.8. Температура размягчения ip, стекол, °С [40]

Стекло	'р	Стекло	'р
Кварцевое:		N51-A	574
КВ, КУ, КВР	1160	Multal	670
ки	1220	Sial	590
I	1300	Волоконное бесщелочное	830
II	1100	Волоконное натриевое	710
Лабораторное		Листовое оконное	600
	580	Медицинское НС-1	630
N29	565	Медицинское АБ-1	590
Ц32	590	Пеностекло	<600
N846	582	Пеностекло кремнеземистое	1100
Термохтойкое:	620	Сортовое (посудное)	560
N13	680	Ситаллы СТЛ	980
Т16	680	Ситаллы СТМ, СТБ	930
Т28	645	Стекло для труб 13 в	725
Щ23	710	**Стекло для труб ситалловое**	1100
Ц26	730	**Хрустальное (свинцовое)**	530
Пирекс	565	Шлакоситаллы	950
Симакс	570		
Uninost	530		

Таблица 12.9. Температура размягчения fp пластмасс и полимеров, *"С* [29, 41—44]

Пластмасса	'р	Пластмасса	'р
Аман	180	Поликарбонаты	220
Аишопласты	100	Полиметилметакрилат	120
Асботекстолит	130	Полипропилен	152
Асбостеклотекстолит	130	Полистирол	90
Винипласт	180	Полиуретан	85
Гетинакс	150	Полиформальдегид	177
Дифлон	150	Полиэтилен	90
Древесно-слоистый пластик	150	Полиэтилентерефталат	130
Делан	150	Полиэфиры	115
Капролон	190	Премиксы	130
Капрон	215	Стеклотекстолит	250
Карбамидные смолы	75	Текстолит	140
Лавсан	155	Терилеи	264
Нейлон	60	Фенопласты	135
Ниплон	330	Фенопласты ударопрочнше	140
Оргстекло СОЛ	90	Фторопласт-3	125
Оргстекло 2-55	133	Фторопласт-3М	150
Пенопласт изолан	210	Фторопласт-4 (тефлон)	260
Пенопласты	140	Фторопласт-4М	220
Пенопласты эпоксидные	170	Фенилон	150
Пенополиуретаны	230	Целлофан	60
Пентапласты	160	Целлулоид	40
Полиакрилаты	65	Шеллак	80
Полиамиды	190	Эпоксидные смолы	150
Полиарилаты	190	Эпоксикремнийорганический материал КЭП	220
Поливинилфторид	196	Этролы	70
Поливинилхлорид	**60**	Энант	225
Полиимиды	**250**		

Таблица 12.10. Температура кристаллизации (застывания) топлива, масел и гидравлических жидкостей, °С. Вещества расположены в порядке возрастания [44, 22, 38]

Вещество	*t*	Вещество	*t*
Топливо*		**Масло смазочное*2**	
Бензин Б-70	—60	**МП-609**	**-80**
Керосин	—38	**МП-601**	**-70**
Реактивное Т8	—55	**МПВ**	**-60**
Дизельное А	—55	**МАС-19Н**	**-49**
Дизельное ЗС	-45	**И-12А**	**—30**
Дизельное 3	-35	**И-5А (велосит)**	**-25**
Дизельное Л	-10	**И-8А (швейное)**	**—20**
Мазут:		**И-20А, И-40А**	**—15**
топочный		**И-70А. И-100А**	**-10**
Флотский	—6	**Вакуумное ВМ-1**	**-12**
Мазут 40	10		
Мазут 100, МП	25	**Нигролы*2**	
Масло трансформаторное*®		Зимний	**-20**
ФМ-5	-ПО	ТС-14,5	**-15**
ФС-5	-100	Летний	**—5**
ФС-56	-90		
АТМ-65	-70	**Гидравлические жидкости*^**	
Гексол, ПМС-50	-60	АМГ-10, МГЕ-10	-70
Т-750, Т-1500	-53	**РМ, МГЗ**	—60
ТК, ТКп	-45	**ЭШ**	-50
С-220	—30	**АУ, ?, АУП**	-45
ГХБД	—21	**МГ-30**	—35
ТХБ	— 16	**ИС-12, ОМТИ**	**-30**
Совтол	—7	ИС-50	**—20**
Ссвол	5	МС-20	**— 18**
Масло моторное*®		ИС-20	—15
МТ-14П	-43		
МТ-16П	-25		
МС-20П	-18		
Моторное Т	0		

Температура кристалл
Температура застывания.

Таблица 12.11. **Температура плавления <„л и кипения <кип хладонов, антифризов и теплоносителей, °С (хладоны приведены в номенклатурном порядке, остальные вещества — в порядке возрастания/„л) [37, 38, 45]**

Марка или состав, %	'пл	II	Марка или состав, %	'пл	'кип
Хладоны			R116	-100,6	—78,21
R11	—111,0	23,65	R142	-138,0	—9,20
R12	-155,9	—29,74	R143a	—111,3	—47,58
R12B1	-80,0	—3,83	R152	—117	24,54
R13	-180,0	-81,59	RC318	-41 ,4	-5,97
R13B1	—143,2	—57,77	Антифризы		
R14	-184,0	—128,02			
R21	-135,0	8,37	ТОСОЛ-А65	-65	115
R22	—160,0	—40,81	ТОСОЛ-А40	—40	108
R23	—155,0	—82,14	ТОСОЛ-А	-35	170
R30	—96,7	40,10	Теплоносители		
R40	-97,8	—23,86			
R113	—35,0	46,82	Силикон МАИ	—100	191
R113B2	—72,9	94,57	Этиленгликоль 67; вода 33	-73	
R114	-93,9	3,63	CaCl 29,9; вода 60,1	-55	
R114B2	—110,,5	47,15	Пропиленгликоль 60; вода 40	-50	—
R115	-106,0	-38,97			

Продолжение табл. 12.11

Марка или состав, %		
МИПД	—47	290
гкс	- 3 6	440
гкос	- 3 3	457
цтм	- 3 0	296
Цифенилбутан	- 2 5	
гіСІ4	- 2 3	153,9
\аС) 23,1; вода 76,9	- 21,2	
ДКМ	- 2 2	335
Глицерин	—17,9	290
Дифенилэтан	- 1 7 , 9	272,6
Этиленгликоль	- 1 5 , 6	197,3
Na22, К78	- 1 1	784
Дифенил 30,9; орпго-терфенил 47,5; жета-терфенил 21,6 ' Na56 К44	10,5	297,5
Дифенил 40,2; орто-терфенил 59,2; пара-терфенил	22,7	287
Дифенил 50,5; орто-терфенил	23	286,5
Дифенилметан	25,4	264,3
Дифениловый эфир	27,0	258,5
орто-Терфенил 65,8; *мета*-терфенил 33,5; иара-терфенил 0,7		346
орто-Терфенил 66,3; мета-терфенил 33,7	29,3	345,5
TiBr4	39	230
ортo-Терфеннл	56,25	337.5
AICIЗ 22,5; A1Bгз 77,5	67	**200**
Дифенил	69,5	255.6
AICIЗ 80,7; NaCI 9,7; КС1 9,6	70	254
Нафталин		
жета-Терфенил	87,45	379
Bi 55,5; Pb 43,-5	125	1670
яара-Терфенил	212.7	384

Многие технические материалы в твердом состоянии являются солавами, твердыми растворами или аморфными веществами; процесс их плавления отличается от плавления чистых веществ.

Плавление сплавов и твердых растворов обычно происходит в некотором интервале температур — от нижней температуры (солидус) до верхней (ликвидус); внутри этого интервала вещество находится в гетерогенном состоянии. Исключением являются эвтектические сплавы, у которых солидус и ликвидус совпадают. **В** табл. 12.4—12.7 приведена температура плавления (как правило, солидус) технических материалов — полупроводниковых, оптических и высокотемпературных веществ, сталей, промышленных и специальных сплавов.

Плавление (и затвердевание) веществ, имеющих в твердом состоянии аморфную структуру, не имеет выраженной температуры перехода, оно совершается постепенно и характеризуется температурой размягчения (и соответственно застывания). В табл. 12.8, 12.9 приведена температура размягчения аморфных твердых материалов этого типа — стекол и полимерных материалов, а в табл. 12.10 —температура застывания некоторых технических жидкостей

В табл. 12.11 приведены температуры плавления и кипения жидкостей, используемых в качестве теплоносителей и хладонов.

12.3. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Процессы плавления, кипения и сублимации зависят от давления в соответствии с уравнением Клапейрона—Клаузиуса

$$dT/dP = T(AV/AH),$$

где ***T,*** АЯ-температура и теплота перехода; ДК —изменение объема вещества при переходе; ***P*** — давление.

Температура кипения и сублимации всегда возрастает с увеличением давления. Зависимость Ткип(Р) и Тсуел(Р) называют кривой упругости пара; соответствующие данные приведены в гл. 11.

Температура плавления также, как правило, возрастает с увеличением давления. Отклонения наблюдаются для отдельных веществ на ограниченных интервалах давления и объясняются несоответствием плотности упаковки атомов в жидком состоянии и структуры кристаллического состояния. Зависимости Txin(P) для элементов и некоторых неорганических и органических соединений приведены в табл. 12.12, 12Л3. Там же приведены значения производной dTnnldP, с помощью которых можно вычислить значение Гпл при сравнительно малых отклонениях от нормального давления (до 100—1000 МПа).

Таблица 12. 12. Температура плавления элементов Гпл. *"С* зависимости от давления *dt„„/dP,* 10-2 *Х/МШ,* при нормальном давлении [6,15]

Элемент	*dt^Jdp*	Давление, МПа							Дополнительная литература
		10	50	100	500	1000	3000	5000	
Азот	21,95	—208	—200	—190,9	-149,2	—	—	—	
Актиний	19,40	1052	1060	1069	1147	1244	1632	2020	
Алюминий	6,41	661	663	667	692	724	852	981	
Америций	2,50	1175	1176	1177	1185	1200	1245	—	
Аргон	24,89	-187	-177	-166,8	—95,8	—	—	—	
Астат	55,80	307	330	358	—	—	—	—	
Барий	4,30	727	729	731	748	770	715	590	
		500	(6 ГПа)	525	(7 ГПа)	380	(7,5 ГПа)		
Бериллий	5,00	1287	1289	1292	1312	1337	1437	1537	
Бром	-25	—	—		80	170	—	—	
Ванадии	15,7	1918	1925	1933	1995	2074	2388	2702	
Висмут	—3,57	271	269	267,5	252	228	250	425	
		180	(2 ГПа)	500	(6 ГПа)				
Водород	29,60	-256	-247	-239	-198	—160	—	—	
Вольфрам	7,80	3347	3350	3354	3385	3424	3580	3736	
Гадолиний	5,7	1312	1315	1318	1340	1369	1450	1480 (4 ГПа)	
Галлий	—2,11	30	29	28	19	8	50	100	
Гафний	17,3	2232	2238	2247	2316	2403	2749	3095	
Гелий	25,7	—269,8	—264	—258,4	-246	(0,3 ГПа)			
Гелий-3	18,2	-270,7	—263	-258,4	-246,2	(0,3 ГПа)		—	
Германий	-3,80	937	936	934	922	902	826	750	
Гольмий	14,30	1475	1481	1488	1545	1617	1903	2189	
Дейтерий	24,50	-252	-244	-236	—197,9	—157,7		—	
Европий	12,80	823	828	835	886	950	1000	980	
								960 (7 ГПа)	
Железо	3,00	1538	1539	1541	1553	1568	1628	1645	
Золото	6,20	1064	1067	1070	1095	1126	1224	1336	
Индий	5,22	157	159	162	182	205	287	380	
								540 (9 ГПа)	
Иод	21,7	116	124	135	222	331	575	670	
								(4,5 ГПа)	
Иридий	6,2	2447	2450	2453	2478	2509	2633	2757	
Иттербий	17,0	816	823	831	902	990	1215	1230 (4 ГПа)	
Иттрий	16,5	1529	1536	1544	1610	1693	2023	2353	
Кадмий	5,3	321	324	326	347	374	480	586	
Калий	17,71	64	71	78,5	127	167	240	275	
Кальций	14,90	843	849	857	916	985	1090	**1200 (4 ГПа)**	
	800	(ЮГПа)	710	(12 ГПа)					
Кислород	11,42	—218	-213	—208	—190	(0,3 ГПа)		—	
Кобальт	3,50	1492	1494	1495	1509	1527	1597	1667	
Кремний	-5,81	1419	1417	1414	1391	1330	1230	1110	
Криптон	30,13	-154	—143	-129	—40	48			
Ксенон	38,90	—	-93	—75	43	(0,3 ГПа)			
Лантан	2,50	920	921	922	932	945	995	1045	
Литий	3,41	181	182	184	194	204	228	242	
Лютеций	15,90	1664	1671	1679	1742	1822	2140	2458	
Магний	7,50	651	654	657	687	725	875	1025	
Марганец	3,30	1245	1246	1248	1261	1278	1344	1410	
Медь	4,69	1084	1085	1088	1107	ИЗО	1215	1310	
Молибден	0,96	2611	2611	2612	2616	2620	2640	2659	
Мышьяк	5,7	818	819	823	846	860	920	940	
Натрий	8,77	99	102	105,9	136	175	245	285	
Неодим	2,60	1024	1025	1026	1037	1050	1080	1080	
		1075	(6 ГПа)						
Неон	13,16	-247	— 242	-235	—216	(0,3 ГПа)		—	
Нептуний	2,30	637	638	639	648	670	720	760 (4 ГПа)	
Никель	3,70	1455	1457	1459	1473	1492	1566	1640	
Ниобий	16,2	2470	2477	2485	2550	2631	2955	3279	
Олово	2,61	232	233	234	245	256	299	420	
Осмий	6,50	3045	3048	3051	***3077***	3110	3240	3370	
Палладий	6,40	1554	1557	1560	1586	1618	1746	1874	

Продолжение табл. 16. 15

Элемент		Давление, МПа						
		10	50	100	500	1000	3000	5000
Платина	6,20	1749	1752	1755	1780	1811	1935	2015
Плутоний	- 7 , 9	638	635	631	599	560	500	515
Празеодим	–	934	–	-	-	940	935	920
Прометий	31,30	1093	1105	1121	1246	1403	2029	2655
Протактиний	18,40	1574	1581	1590	1664	1756	2124	2492
Радии	21,30	842	850	861	946	1053	1479	–
Радон	34,60	—68	—54	- 3 7	–	–	–	—
Рений	3,20	3177	3178	3180	3193	3209	3273	3337
Родий	5,90	1963	1966	1969	1992	2022	2140	2258
Ртуть	5,21	—38	—36	—34	—13	12,06	100	190
Рубидий	21,11	41	49	57,9	115	164	235	280
Рутений	6,10	2250	2253	2256	2280	2311	2433	2555
Самарий	6,0	1072	1075	1078	1102	1132	1180	1200
Свинец	7,73	328	331	335	364	398	516	612
Селен	20,76	224	233	243	317	390	605	680
Сера (ромб.)	31,30	—	1351,	148	226	270	630 –	(5,5 ГПа)
Сера (моноклин.)	33,14	117	130	143	—	280	415	560
Серебро	4,90	961	963	966	985	1010	1108	1206
Скандий	15,10	1542	1548	1556	1616	1692	1994	2296
Стронций	16,50	769	776	784	850	933	ИЗО	1160 (4 ГПа)
Сурьма	- 0 , 5 8	630	630	630	628	624	610	589
Таллий	6,53	304	306	310	336	368	489	–
Тантал	5,40	2976	2979	2981	3003	3030	3138	3246
Теллур	4,50	450	452	454	–	460	450	510
Гербий	7,40	1357	1360	1363	1393	1450	1500	(2,5 ГПа)
Технеций	5,50	2200	2203	2205	2227	2255	2365	2475
Титан	15,40	1609	1616	1623	1685	1762	2070	2378
Торий	18,60	1752	1759	1768	–	—	—	—
ТритаЙ	22,12	—250	— 243	—235	—213	**(0,3 ГПа)**	—	—
Углерод	19,60	3764	3772	3781	3860	**3958**	4350	4742
	4200	(7,5 ГПа)	3710	(8 ГПа)				
Уран	18,10 1150	1136 (7 ГПа)	1143	1152	—	1150	1170	1160
Фосфор	29,92	47	59	72,7	171,6	950	1030	(2 ГПа)
Хром	15,90	1878	1885	1893	1956			—
Цезий	25,93 100	**32 (4 т а)**	42	52	98.5	160	190	170
Церий		798 (7,5 ГПа)	797	794	774	750	670	700
Цинк	4,81	420	422	424	443	466	547	619
Цирконий	16,30	1880	1887	1895	1960	2042	2368	2694

Таблица 12.13. Температура плавления индивидуальных соединений в зависимости от давления и производная *dtj,JdP*, 10-^ °С/МПа, при нормальном давлении [171

Соединение	«"„л/^Р	Давление, МПа					
		10	50	100	500	1000	3000
		Неорганические соединения					
Алюминия антимонид	**—6,90**	1059	1056	1053	1025	1 991	853
Аммиак		-77	-74	-70	-56 (0,,? ГПа)		–
Вода [6]	-7!68	-0,8	-3,84	-8,8	—7,5	26	135
		-22,0 (5	14.3 МПа)	-17 (357 3 МПа)		0,16 (646,4 МПа)	
Вода тяжелая, DjO	-7,78	3	0	-5	-11(0,3 ГПа)	–	–
Вольфрама карбид [20]	0.0	2850	2850	2850	2850	2850	2850
Галлия антимонид	-5,0		697	695	675	650	550
Галлия арсенид	-3,4	1138	1136	1134	1121	1104	1036
Индия антимонид	-10,0	1024	1020	1015	975	925	403
	449 (5	ГПа)					
Индия арсенид	-4,29	939	938	936	918	897	811
Индия фосфид	—2,91	1060	1058	1057	1045	1031	973
Калия тетрасиликат	-6,02	764	762	759	–	–	–
Кадмия теллурид	—20,0	1043	1035	1025	945	845	–
Кремния тетрахлорид [16]	31,25	-65	-53	-38	67,7	**183,8**	–
Лития хлорид	24,22	607	617	629	715	**810**	–
Меди хлорид	-1,16	430	429	429	424	417	381
Натрия бромид	28,66	744	755	769	868	973	–
Натрия иодид	**32,81**	658	671	687	798	914	1245
Натрия фторид	**16,08**	993	1000	1007	1063	1120	–
Натрия хлорид	23,81	803	812	824	910	1004	–
Ортофосфорная кислота	8,13	43	46	50	–	–	–
Рубидия хлорид	25,01	720	729	741	815	1128	1426
Серебро азотнокислое	9,09	213	216	239	257	303	–
Синильная кислота	23,28	—12	—3	7	40 (30	МПа)	–
Углерода двуокись [16]	20,82	-55	—47	-5	21,4	75,4	93,5
Углерода дисульфид [16]	13,06	-ПО	-105	-74	—52	0	170
Углерода тетрахлорид [16]	40,50	-19	-3	15	128	192,1	–
Цезия хлорид	48,29			707	870	1039	
		Органические соединения					
трет-Амиловый спирт	22,02	-6	2	3	—	—	
Анетол	21,42	25	33	43	77 (300		
Анилин [16]	21,31	—4	4	13,1	81		
Ацетамид [16]	14,20	83	88	93,1	128	166	
Ацетонитрил	21,20	-42	-33	—24	44	112	
Ацетофенон	25,05	22	32	42	78 (300	МПа)	
Бензиловый спирт	15,38	-14	—8	0	–	–	
Бензойный ангидрид	26,43	46	56	69	–	–	
Бензол [16]	29,79	9	20	32,5	117	190,]	
Бензонитрил	**20,40**	-11	-3	7	86	180	
Бензофенон [16]	**28,93**	51	62	74,6	163	248	
Бетол	37,15	99	112	126	166 (300	МПа)	
Бромбензол [16]	20,50	-29	-21	-12,1	50	107,1	
1-Бромнафталин	27,52	9	20	34	–	–	
жета-Бромнитрофенол	23,41	56	65	77	–	–	
Бромпропан [16]					-56	0	
Бромтолуол	31,12	41	53	67	116 (300	МПа)	
Бромуксусная кислота	18,45	57	64	73	–	–	
Бромэтан	12,58	-118	-И 3	—107	-67	28	
н-Бутиловый спирт [16]	14,81	-88	-83	-76	-30	12	
трет-Бутиловый спирт	41,35	30	44	58	97 (300	МПа)	
Валериановая кислота	16,23	-33	-26	—18	–	–	
Дибензил	36,42	55	68	84	–	–	
1,4-Дибромбензол	38,51	91	106	123	–	–	
Дибромметан [16]		–	27,5	34,0		–	
1,2-Дибромэтан [16]		—	22,45	34,0	–	–	
1,4-Диоксан	11,81	13	17	23	–	–	
Дифениламин	28,0	57	68	80	165	213	

Соединение	'"ш/''Р	Давлен!!е, МПа					
		10	50	100	500	1000	3000
1,2-Дифенилэтан [16]				68,4	83,2 (200 МПа)		
Дифенилметан	60,65	33	52	71	119 (300 МПа)		
Дихлормеган (16]	–	–			- 4 6 1 0		157
1 а кислота	21.74	117	126	137	–	–	–
Диэтиловыи Эфир	13,66	- 1 1 5	— 109	- 1 0 2	- 7 5 (300 МПа)		–
Долека.1	24,35	- 7	2	13	79 1	–	–
Иолтолуол	31,56	38	50	65	115 (300 МПа)		–
Камфора	127,3	189	214 (30 ИПа)		–	–	–
Каприловая кислота	18,87	18	26	35	–	–	–
ор К [6|	18,13	32	39	69	86	218	–
летс-Крезол	13,73	13	19	26	—	–	–
парс-Крезол	23,08	36	45	56	97 (300		–
КротоЕюваи кислота	37,29	75	82 (30 МПа)		–	–	–
орто-Ксилол	23,53	- 2 3	- 1 3	- 1	–	–	–
жига-Ксилол	20,47	- 4 3	- 3 5	- 2 5			
	35,08	17	31	47	–	–	–
Масляная кислота	19,12	- 4	4	14	–	–	–
Акитол	25,10	45	55	65	99 (300 ^1Па)		–
Метан	27,30	- 1 8 0	- 1 6 9	- 1 5 5	- 1 0 1 (300 МПа)		–
Метилбензоат	20,16	- 1 0	- 2	8	- i1 —		–
А^етиловый спирт	6,13	- 9 7	- 9 5	- 9 2	—79 (300 МПа)		–
Метилоксалат	22,73	57	65	76	151	–	–
Метилциклогексан	7,11	—126	- 1 2 3	- 1 1 9	—95	—69	–
Метилциклопентанол	18,34	37	45	54	–	–	–
Миристиновая кислота	25,60	61	70	81	116 (300 МПа)		–
Муравьиная кислота	13,2)	10	15	21	40 (300 МПа)		–
Нафталин	39,4	84	99	–	- -		–
Нафтиламин	4,93	51	52 (30 МПа)		1		–
1-Нафтол	24,53	98	108	120	164 (300 МПа)		–
Нитробензол [16]	23,68	8	17	27,9	107	184,5	–
Нитрометан	**14,0**	- 2 7	- 2 2	- 1 5	- !1 -		–
1-Нитронафталин	**4,35**	59	61	63	72 (300 МПа)		
о/)то-Нитротолуол	**20,59**	- 1	7	17	92		
жета-Нитротолуол	24,83	19	28	41	–	–	–
пй/щ-Нитротолуол	29,05	55	66	79	–	–	–
о/то-Нитрофенол	22,14	48	57	68	110 (300 МПа)		–
жста-Нитрофенол	19,83	98	106	115	**151 (300 МПа)**		–
пара-Нитрофенол J16]	27,26	115	125,5	137,1	**198,8 (400 МПа)**		
Нонан	13,33	- 5 2	- 4 7	—40	8	96	205
Октадекан	25,73	30	40	51	119	–	
Пальмитиновая **кислота**	20,75	66	74	84		–	–
Пентадекан	31,77	13	25	124		–	–
Пентахлорэтан	22,56	—27	—18	—6	–	–	–
Пиридин	17,30	—9	- 2	6	–	–	–
Пропилбромид	12,76	- 1 0 9	- 1 0 4	—98	- 5 3	- 6	142
Пропионовая кислота	22,50	—19	- 1 0	0	–	–	–
Салол	26,90	44	55	68	–	–	–
Тетракозан	25,31	53	58 (30 ЛПа)		–	–	–
Тимол	22,85	54	62	71	97 (300 МПа		–
Тиофен	54,69	—33	- 1 4	6	105	–	–
орто-Толуидин	18,80	- 1 4	—7	3	59	–	–
парс-Толуидин [16]	25,55	46	56	68	153	204,9 (8(СО МПа)	
Трибромметан [16]	25,66	10	20	31,5	115	194	–
Тридекан	24,78	12	21	32	101	–	–
Трифенилметан	38.05	96	110	126	178 (300 МПа)		
Уксусная кислота [16]	24,70	19	28	37,7	119	148,3	–
Уретан	114,6	59	103	156	81	176	–
Фенол [16]	14,7	42	48	53,4	115,48	184,6	–
Формамид	9,54	4	7	12	–	–	–
Хлорбензол [16]	18,89	—44	—36	- 2 8	25	84,5	222 (2.5 ГПа)
летс-Хлорнитрофенол	24,27	47	57	68			
Хлороформ [16]	16,56	—62	- 5 5	—47	17	79	243 (2,5 ГПа)

Соединение	"innMP	Давление, МПа									
		10	50	шо	1	500	1	1000	1	3000
Хлортолуол	27,81	И	21	34		78 (300 МПа)				—
Хлоруксусная кислота [16j	17,34	63	71	**80**		128		165		–
Цетиловый спирт	23,84	51	61	**72**						
Циклобутанон	24,42	- 4 9	- 3 9	**—28**		13 (300 МПа)				Z
Циклогексан	54,12	12	33	59		–		–		–
Циклогексанол	40,82	30	46	66		–		–		–
Энантовая кислота	18,27	—6	2	И		–		–		–
Этилацетат	11,34	—82	- 7 8	—73		- 3 5		5		119
Этиловый спирт [16]	9,14	- 1 1 6	—113	- 1 0 8		- 7 5		- 3 8		82

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Свойства** неорганических соединении: Справочник/ А. И. Ефимов и др. Л.: Химия. 1983.

2. **Термодинамические** свойства неорганических веществ/У. Д. Веретенин и др. Под ред. А. Н. Зефирова. М.: Атомиздат. 1965.

3. **Физико-химические** свойства окислов: Справочник/ Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1978.

4 Landolt-Bornstein Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Astronomie, Technik. 4 Tell. Berlin: Springer-Verlag. 1961.

5. Selected Values of Chemical Thermodinamic properties. Circular NBS, № 500, Washington. 1952.

6. **Регель А. Р., Глазов В. М.** Периодический закон и физические свойства электронных расплавов. М.: Наука. 1978.

7. Самсонов Г. В., Виницкий И. М. Тугоплавкие соединения: Справочник.— 2-е изд. М.: Металлургия. **1976.**

8. **Некрасов В. В.** Основы общей химии.— 3-е изд. М.: Химия. 1973. Т. 1, 2.

9. **Nuclear** Wallet Cards/Ed. V. S. Shirley, C. U. Lederer. N. Y, 1979.

10. **Свойства** элементов: Справочник/Под ред. М. Е. Друц. М.: Металлургия. 1985.

И. Термические константы веществ. Вып. 1—10/Под ред. В. П. Глушко. М.: Изд-во АН СССР. 1965—1982.

12. Убеллоде А. Плавление и кристаллическая структ^ра: Пер. с англ./Под ред. А. И. Китайгородского. М.:

13. **Свойства** органических соединений: Справочник/ Под ред. А. А. Потехина. Л.: Химия. 1984.

14. Кэй Дж., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора: Пер. с англ. М.- Изд-во иностр. лит. 1949.

15. Cannon J. F.//Phys. and Chem. Ref. Data. 1974. Vol. 3, № 3. P. 781—824.

16. Справочник химика. — 3-е изд./Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Химия, 1971. Т. 1.

17. Babb S.//Rews. Mod. Phys. 1963. Vol, 35, № 2. P. 400—412.

18. Vezzoli G. C., Wilsh **P.** J.//High Temp.—High Press. 1977. Vol. 9, № 3. P. 345—349.

19. Liebenberg **D. H.** e. a.//Phys. Rev. B. 1978. Vol. 15, № 9. P. 4526—4532.

20. Vereshchagin L. F., Fateeva N. S.//High Temp.- High Press. 1977. Vol. 9, № 6. P. 619—628.

21. Свенсон К. Физика высоких давлений: Пер. с англ./Под ред. Л. Ф. Верещагина. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.

22. Товарные нефтепродукты. Свойства **и** применение: Справочник/Под ред. В. М. Школьникова. М.: Химия. 1978.

23. Vaidya S. N.//High Temp.—High Press. 1979. Vol. 11, №3. P. 335-338.

24. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина.— 1-е изд. М.: Атомиздат, 1976.

25.ФОКИН **М. И., Русков Ю. С, Мосолов А. В.** Титан и его сплавы в химической промышленности. Л.: Химия, **1978.**

26. Справочник литейщика/Под ред. Н. Н. Рубцова. М.. Гостехтеориздат. **1962.**

27. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник.— 3-е изд. М.: Металлургия. **1974.**

28. Орлов И. Д., Миронов В. М. Справочник литейщика М.: Гостехтеориздат. 1960.

29. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. — 6-е изд. М.: Машиностроение. **1982.** Т. **1—3.**

30. Кристаллохимические, физико-химические и физические свойства полупроводниковых веществ/Г. Б. Бокий **и** др. М.: Изд-во стандартов. **1973.**

31. **Рябцев Н. Г.** Материалы квантовой электроники. М.: Радио, 1972.

32. Кузьминов Ю. С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука. **1982.**

33. Кузьминов Ю. С. Ниобат и таниталат лития. М.: Наука. **1975.**

34. Кржижановский Р. Е., Штери З. Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы) Л.: Энергия **1976.**

35. **Кржижановский Р. Е., Штери З. Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов (карбиды). Л.: Энергия. **1977.**

^^^36. **Smithsonian** Physical Tables. 9th ed. Washington.

37. Канаев А. А., Конп И. З. Неводяные пары в энергомашиностроении. М.: Машиностроение. **1973.**

38. Негорючие теплоносители и гидравлические жидкости: Справочное руководство/Под ред. А. М. Сухотина. Л.: Химия. **1979.**

39. **Коган В. А.** Справочник по металлам и сплавам для полиграфистов. М.: Книга. 1976.

40 **Стекло:** Справочник/Под ред. Н. М. Павлушкина. М.: Стройиздат. 1973.

41. Калинчев Э. Л., Саковцева М. Б. Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. Л: Химия. **1983.**

42. Каценельсон М. Ю., Балаев Г. А. Пластические массы. Свойства и применение: Справочник. — 3-е изд. Л.: Химия, 1978.

43. Каценельсон М. Ю., Балаев Г. А. Полимерные материалы: Справочник. Л.: Химия, **1982.**

44. Справочник по электротехническим материалам.— 2-е изд./Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тараева. Л.: Энергия. **1976.**

45. Перельштейн И. И., Парушин Е. Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. М.: Легкая и пищевая промышленность. **1984.**

ГЛАВА 13

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ

Э. Б. Гельман

13.1 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Уравнением состояния называют уравнение /(P, ***V, T)=0,*** отражающее функциональную связь между температурой ***T,*** давлением ***P*** и объемом ***V*** вещества в состоянии термодинамического равновесия. В настоящее время теоретически обоснованные формы уравнения состояния получены только для вещества в твердом кристаллическом и газообразных состояниях.

Уравнение состояния твердого тела наиболее разработано в форме уравнения Ми — Грюнеизена **[1]**

$$PV = P,V + 2m£,$$

где ▷0 —давление при Г=0; Y — постоянная Грюнейзена; ***E*** — тепловая энергия кристаллической решетки.

Значение Ро определяется структурой решетки и потенциалом взаимодействия ее частиц и для некоторых веществ может быть записано в виде

$$P, = Аг^ \exp \{Ь (1 - r)\} - Кг-'",$$

где r={VIVo)4^ (Vo — объем тела при нормальных условиях, м®; параметр т = 4 для молекулярных кристаллов и т = 9 для ионных кристаллов и нещелочных и других металлов с сильным перекрытием электронных оболочек; параметры ***A, К к b*** определяются из эксперимента и для ряда веществ приведены в табл. 13.1.

Слагаемое ***2yE*** в уравнении Ми — Грюнейзена учитывает влияние температуры; его значение может быть сравнимо со значением ***PeV,*** а при высоких температурах и превосходить его.

Постоянная Грюнеизена [2] у^^VIkrCv, где Р — объемный коэффициент температурного расширения; *Cv* – теплоемкость тела при постоянном объеме; кт — изотермический коэффициент сжимаемости, слабо зависит от температуры и объема. Тепловая энергия решетки в первом приближении равна £=(3/2)ЙГ (для одного моля вещества), ее значение может уточняться в рамках теории твердого тела (Дебая, Эйнштейна и др.).

13.2. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

Единственной теоретически обоснованной формой уравнения состояния газа является вириальное уравнение состояния [3]

$$PV/RT = 1 + S/V^ + C/V'' + \ldots, \quad (1)$$

где V—объем одного моля газа, см^/моль; Л — газовая постоянная; В, см^/моль; С, см^/моль^ — второй, третий и т. д. вириальные коэффициенты, которые зависят от -температуры и не зависят от давления и плотности **газа.** При малой плотности (V—)-оо) уравнение (1) выражается в уравнение состояния идеального газа ***PV=RT-,*** второе, третье слагаемые **и** т. д. описывают по-

Таблица **13.1. Постоянная Грюнейзена и параметры уравнения состояния Ми—Грюнейзена некоторых веществ — постоянная Грюнейзена при степени сжатия S = V/Vo)**

Вещество	7»	Ъ.6	*A,* 101" Па	*Ь*	
	Металлы и полупроводники				
Ag	2,47	1,9	2,6887	13,5293	2,8691
Al	2,13	1,6	2,4433	10,9916	2,6180
Ли	3,05	2,6	8,8721	7,9029	9,0Э35
Be	1,17	1,0	1,7918	19,9553	2,0571
Cd	2,27	1,6	24,9938	2,5933	24,9224
Co	1,99	1,6	90,2906	2.6438	90,5267
Си	2,04	1,6	5,2703	9.9448	5,4910
Fe	1,68	1,3	9,9743	7,0985	10,1639
Ge	0,72	0,4	4.5765	7,1077	4,6185
In	2,24	2,0	1,2274	11,5108	1,3320
Mg	1,46	1,1	2.8386	5,7902	2,9191
Mo	1,58	1,2	15,8570	7,0914	
Nb	1,68	1,4	19,8079	4,6213	19',9267
Ni	**1,91**	1,4	4,7646	13,9474	4,9922
Pb	**2,78**	2,4	1,7719	9,3517	1.8836
Pri	2,18	1,4	5,4307	12,3419	5,6172
P t	2,63	2,2	13,6590	8,3348	13,8758
Rh	2,26	2,0	27,3303	5,3840	27,5471
Sb	0,86	0,2	1,0437	13,0215	1,0790
Si	0,74	0,3	4,3669	8,8513	4,4217
Sn	2,03	1,5	1,6923	11,6741	1,7868
Ta	1,69	1,3 i	9,5038	7,5979	9,6194
Th	1,12	0,6	2,6096	8,1274	2,6512
Ti	1,18	0.8	1,3882	23,8180	1,4761
и	1,83	1.4	4,4319	10,2740	4,5397
V	1,29	1,0	9,2284	7,1227	9,3461
w	1,55	1,2	17,3243	7,3234	17,4481
Zn	2,38	1,6	1,8403	12.1914	2,0362
Zr	0,77	0,6	3,8994	8,6963	3,9410
	Ионные кристаллы и минералы				
Al2O3	1,60	1,4	41,4459	4,2629	41,7202
CsBr	1,93	1,5	0,8952	7,5090	0,9547
CsCl	1,97	1,4	0,5567	11,4866	0,6259
Csl	2,01	1,5	0,5456	9,0538	0,5968
	1,40	1,0	26,6830	3,9333	26,8730
	1,50	0,9	4,1727	12,7322	4,3377
MgO	1,40	1,0	10,7374	6,7287	10,9796
NaBr	1,56	1,0	0,6910	10,8196	0,7644
NaCl	1,55	1,0	1,0849	8,9488	1,1733
NaI	1,59	1,0	0,4397	12,3490	0,4972
SiO^	0,71	–	1,1129	12,6690	1,2123
Андрадит	1,1	0,5	4,6282	**11,9457**	4,8305
Гранат	1,4	1,2	29,4744	**3,8243**	29,7665
Гроссуляpит	1,0	0,2	2,6384	17,6332	2,8428
Диопсид	0,9	0,2	2,2236	17,0914	2,3652
Лабрадор	0,4	0,2	10,0589	4,1678	10,1128
Оливин	1,2	1,0	25,5397	3,4413	25,7285
Ортоклаз	0,5	0,1	3,4593	6,7857	3,5255

Таблица 13.2. Второй вириальный коэффициент газов B, см3/моль [6]

т. к	Ar	CF,	си^	CH3C!	CH3P	CHCb			
293,15	-16,85	-91,18	-45,19	-439,61	—193,28	-1430,49	-162	-145,92	-381,96
400	— 0,82	—33,71	—15,69	—208,31	—103,88	-580,56	—87	—72,30	—171,68
500	7,17	- 4,50	— 0,81	— 128,24	-58,66	—348,42	-51	-35,92	-66,09
600	12,25	**13,57**	8,67	-86,32	—34,70	-241,47	-28	-13,08	-0,75
700	15,67	**26,03**	15,00	-60,79	-20,16	-181,03	-12	2,47	44,75
800	18,09	34,94	19,63	-43,80	-10,48	—142,42	-1	13,85	77,11
900	19,84	41,47	22,96	-31,64	-3,64	—115,76	7	22,19	101,40
1000	21,19	46,55	25,59	-22,60	1,41	-96,34	14	28,64	120,22
1200	23,01	53,62	29,22	— 10,04	8,04	—69,77	23	37,84	146,60
1400	24,03	58,25	31,60	-1,83	12,51	-52,51	29	44,04	164,09
1600	24,86	61,20	33,06	3,89	15,51	—40,45	34	48,36	176,27
1800	25,49	63,21	34,08	7,23	17,70	—31,57	37	51,53	184,50
2000	25,91	64,91	35.00	11,04	19,90	-24,80	39	53,78	190,26
2400	26,24	67,35	36,26	15,60	20,54	-15,12	43	56,55	199,06

Продолжение табл. 13.2

г. к	со	со.	F.	н.	н,0	He	Kr	N,[33]	NH,
293,15	-10,04	-97,94	—20,97	12,16	—	11,15	—53,79	—5,47	-302,71
400	***7,64***	-49,07	-1,58	14,36	—333,23	10,94	—22,88	9,183	-120,11
500	16,57	-25,0	8,09	14,98	— 163,47	10,72	—7,25	16,45	—68,30
600	22,14	-9,89	14,22	15,66	-98,83	10,51	2,56	21,01	—45,97
700	25,85	0,39	18,37	16,38	—66,30	10,32	9,23	24,03	—29,77
800	28,49	7,92	21,26	16,68	—47,22	10,13	14,01	26,12	-20,83
900	30,39	13,43	23.41	16,70	—34,85	9,97	17,60	27,63	-14,67
1000	31,80	17,70	25,03	16,72	—26,19	9,81	20,32	28,73	-10,19
1200	33,48	23,81	27,29	16,69	-15,07	9,58	24,20	30,08	-4,18
1400	34,76	27,92	28,53	16,55	—8,08	9,37	26,76	30,95	-0,38
1600	35,56	30,78	29,47	16,39	-3,83	9,15	28,53	31,59	2,18
1800	36.19	32,87	30,25	16,22	—0,68	8,93	29,65	31,87	3,93
2000	36,36	34,44	30,78	16,06	1,47	8,72	30,49	32,04	5,37
2400	36,70	36,28	31,21	15,69	4,69	8,44	31,84	32,13	7,30

Продолжение табл. 13.2

т. к	NO	N,0	Ne	o.	Oз	SFe	SO,	SiFj	Xe
293,15	—18,25	—137,07	11,02	— 17,00	— 106,87	—292,12	—573	— 144,01	-134,59
400	-3,98	-65,42	12,47	0,03	-54,20	-139,43	-339	-50,25	-70,79
500	3,36	-29,82	13,19	8,53	-27,73	-63.54	-123,46	-3,09	-39,83
600	7,90	-7,83	13,62	13,91	-11,19	-15,95	-84,62	26,56	-20,40
700	10,98	7,46	13,77	17,49	-0,15	16,41	-61,30	46,95	—6,92
800	13,19	18,43	13,87	20,06	7,96	39,66	-45,85	61,35	2,55
900	14,81	26,63	13,91	21,92	14,03	57,05	-32,92	71,97	9,67
1000	16,04	32,98	13,88	23,33	18,71	70,50	-26,81	80,18	15,29
1200	17,77	41,96	13,75	25,28	25,37	89,57	-15,57	91,72	23,25
1400	18,79	47,94	13,61	26,35	29,83	102,28	-8.21	99,23	28,53
1600	19,47	52,13	13,46	27,21	32,95	111,16	-3,05	103,99	32,32
1800	20,02	53,13	13,31	27,86	35,24	117,59	0,73	107,21	35,10
2000	20,47	57,19	13,16	28,30	36,96	121,89	3,62	109,90	37,19
2400	20,95	59,97	12,87	28.62	38,90	127,80	7,63	113,92	39,91

Таблица 13.3. Третий вириальный коэффициент газов С, смв/моль^ [6]

г, к	Аг	*сю.*	F.	На	н р	Не	N.	о.	SF,
293,15	960	3159	1368	297		98,78	1437	1127	35 868
400	848	2499	1205	283		89,48	1332	1000	28 388
500	807	2173	1146	271		82,90	1288	954	25 044
600	785	2005	1113	260	4650	77,63	1258	928	23 361
700	769	1911	1090	251	2840	73,29	1233	910	22 427
800	756	1852	1072	242	2170	69,65	1210	894	21846
900	744	1814	1056	234	1570	66,57	1188	880	21 442
1000	733	1786	1040	227	1090	63,85	1167	867	21 131
1200	713	1744	1011	215	715	60,50	1128	841	20 646
1400	693	1709	983	204	537	57,40	1092	819	20 233
1600	675	1679	959	195	412	54,30	1059	797	19 853
1800	658	1650	934	188	366	51,20	1028	777	19 492
2000	642	1622	912	181	319	48,09	1000	758	19 148
2400	613	1571	872	169	246	44.73	951	724	18514

правку на неидеальность газа, обусловленную соответственно двойными, тройными взаимодействиями и т. д. его частиц. Значения второго и третьего вириальных коэффициентов некоторых газов приведены в табл. 13.2 и

Помимо уравнения (1) иногда используют разложение *RVIRT* в ряд по давлению *RVIRT=l+B'P+CP^+ ...*, коэффициенты которого связаны с вирнальными коэффициентами соотношениями *B^RTB', C= {RTy{C'+B'^)* и т. д.

Для представления экспериментальных данных часто употребляются различные эмпирические уравнения состояния [4]. В простейшем случае такие уравнения содержат два параметра, которые можно вычислить по известным значениям критических температуры Г„**р,** давления Рьр и объема Vкр. приведенным в табл. 13.4—13.6. Наиболее употребительными из двухпараметрических уравнений являются:

уравнение Ван-дер-Ваальса [4, 5]

24 **3 «Р'**

уравнение Дитеричи [4]

$$P(V - b) = RT \exp\{-a/RTV\},$$

уравнение Вертело [4]

уравнение Редлиха—Квонга [29]

RT

7-1/2 V (V + I

7-5/2

$$a = 0{,}42787?^{\wedge} \qquad b = 0{,}26V'\text{КР}.$$

$P_{кр}$

Иногда используют также эмпирические уравнения состояния, содержащие большее число параметров: модифицированное уравнение Редлиха—Квонга с тремя параметрами [30], уравнение Битти—Бриджмена с шестью параметрами [31], уравнение Бенедикта—Вебба—Рубина с восемью параметрами [32] и др.

Точность аппроксимации эмпирическими уравнениями состояния индивидуальна по отношению к исследуемому газу и зависит от размера области изменения переменных, достигая в отдельных случаях нескольких долей процента Среди двухпараметрических уравнени!! состояния наиболее точным часто оказывается уравнение Редлиха—Квонга. В табл. 13.4—13.6 приведены значения постоянных Ван-дер-Ваальса для некоторых простых веществ, неорганических и органических соединений. По стоянные **ОАВ,** *ЬАВ* химического соединения АВ можнс приближенно вычислить через постоянные ЙА, 6А И ав Ьв компонентов А и В этого соединения:

$$V_{\text{«лв}} = V \quad + \mathbf{V} \qquad к \quad + к .$$

Аналогично можно вычислить постоянные «А-fB, *ЬА+В* для смеси АЧ-В компонентов А, В:

$$= \qquad + \qquad \text{«в};$$

где *X* — концентрация компонента А в смеси. Более точные методы вычисления постоянных Ван-дер-Ваальса см. в [5].

13.3. КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ

Для всякого вещества существуют такие значения температуры Г„**р,** К, давления Р„**р,** Па, объема V**КР** см3/моль, и плотности Ркр, г/см', которые называются критическими температурой, давлением, объемом и плотностью соответственно (в совокупности — критическими

Таблица 13.4. Критические параметры и постоянные Ваи-дер-Ваальса простых веществ [9]. В круглых скобках указана погрешность приведенного значения

			Я^р, МПа	Ркр,	см^/моль	Нм« моль2	см ^/моль
Азот		126,25 (4)	3,399 (2)	0,304 (2)	92,1(6)	0,1368	38,607
Аргон		150,65(10)	4,86(1)	0,531 (1)	75,2	0,1361	32,191
Бром		584 (5)	10,3(5)	1,18	135	0,9624	58,724
Водород:							
нормальный	я-Н^	33,24 (5)	1,297(3)	0,0310	65,5	0,02484	26,635
равновесный	***Р-п1***	32,98	1,293	0,0314	64.2	0,02604	27,313
пара-	***пара-Н^***	32,98(2)	1,293 (3)	0,03116	64.7	0,02453	26,509
Водорододейтерий	HD	35,91 (2)	1,484(6)	0,0484	62.8	0,02535	25,158
Водородотритий	НТ	38,3		0,0667	60.3	0,02574	23.953
Вольфрам [14]	W	**>11 880 [10**					
	Не	5,20(10)	0,229(1)	0,0693	57,5	0,00344	23,599
Гелий-3	***те***	3,34 (2)	0,116(3)	0,0414 [20]	72,5 [20]	0,00279	29,789
Дейтерий:							
нормальный	**«Д:**	38,350 (2)	1,6650(5)	0,0623	60,3	0,02576	23,940
равновесный		38,2	1,65	0,0669	60,3	0,02577	24,037
пара-	.«Р..D,	38,26 (4)	1,6498(61)	0,0623	60,3	0,02588	24,104
Дейте{ютритий		39,5	1,75	0,0867	58,5	0,02596	23,418
Золото [10]	Au	>4820 [14]					
Иод		**826 (20)**	–	0,15Г{121	155 [20]	1,1976	51,667
Кадмий	***К***	>2480 [14]					
Калий	**К**	2280 (50)	15,8(1,0)	0,194 (25)	202 (26)	9,5908	149,90
Кислород		154,78(5)	5,081 (10)	0,41 (2)	78	0,1375	31,662
Криптон	**Й**	209,38 (10)	5,50(1)	0,908	92,3	0,2324	39,549
Ксенон	Хе	1,74(1)	5,841 (1)	1,099 (3)	119,47	0,4192	51,557
Литий [10]	Li		69,4(17,2)	0,12	58(15)	4,3645	48,258
Медь [10]	Си	>5390 [14]					
Молибден [15]	Mo	И 150 (550)	553,3(117,5)	2,62	36,5(3,5)	6,5'Б34	20 ,"945
Назрий	Na	2503 (50)	25,6(1,5)	0,207 (30)	111 (16)	7,1270	101,47
Неон	Ne	44,45(10)	2,72(1)	0.484(1)	41.7	0,0211	16,948
Ниобий [10]	Nb	>9880					
OsoH	Оз	261,05	5,53(1)	0,537	89,4~	0,3592	49,038
Платина [10]	Pt	>6450					
Радон	Rn	377,5	6,326(2)	1,613[11]		0,6570	62,019
Ртуть [10]		1763(15)	153,5(1,5)	5,3(5)		0,5905	
Рубидий		2106(15)	16,2 [10]	0,347 (35)	246 (25)	7,9782	135,00
Свинец [10]		>3970 [14]					
Селен*1 [19]		1590 (20)	38,5(3,0)	1,235 [17]	147 [17]	1,9748	42,916
Сера*2 [18]		1313 (5)	18,21	0,563	158	2,7611	74,941
Серебро [10]		>4300 [14]					
ий нормальный		43,7	2,11	0,112	53,7	0,02642	21,549
			8,1(5)	0,144 [12]	215 [12]	3,3711	124,10
Фтор		144	5,6	0,574 [16]	66,21121	0,1085	26,854
Хлор		417(5)	7,71	0,573	124	0,6576	56,202
Цезий		2043(15)	11,8(3)	0,43 (4)	308(30)	10,356	180,64
Цинк fIO]		>2590114]					
Цирконий [10]		>8950 [14]	–	–	–	–	–

критической точке среднее число атомов в молекуле Se равно 2,3 [17].
В критической точке среднее число атомов в молекуле F равно 2,78 [18].

Таблица 13.5. Критические **параметры и постоянные Ваи-дер-Ваальса неорганических соединений [9]. В круглых скобках указана погрешность приведенного значения**

			Ркр.				
Азот:							
дифторхлорид [20]		337,4	**5,15**			0,6450	68,122
закись		309,58(1)	**7,255(1)**	0,453(1)	97,27	0,3852	44,347

Продолжение табл. 16. 12

			Ркр.			
оксид		**180(1)**	6,5M2)	0,52		0,1444
оксодифторид		349.45(50)				
перекись		431 (1)	**10,Г(1)**	0,56		0,5346
трифторид		233,10(10)		0,574 [12]	123,8 [12]	0,3497
4дардихлорид		337,45(1)				0,6452
Алюминий:						
трибромид			2,89(6)	0,861 (5)	310 [20]	5,8791
триодид [12]		955 [20]		1,002	407	3,6356
трихлорид		625,65(50)	2,64 (5)	0,51 (3)	**261 [20]**	4,3165
Аммиак		405,45(5)	11,283(5)	0,233	73,1	0,4249
Арсин [20]		373,0				
Бор:						
трибромид				0,9(1)	278 [22]	1,4900
триодид [12]				1,10	356	2,5745
трифторид		260,85(10)	4,98(2)		115 [12]	0,3980
трихлорид		451,95(10)	3,87(1)		150 (20)	1,5390
Ванадия оксихлорид		636 [20]		**0.60 [20]**	290	1,7252
Висмут:						
трибромид			8,41	1.487(15)	302	5,1612
трихлорид	BiClg		11,97(40)	**1.210(6)**	261	3,3818
Воздух		413,8	3,77	0,35		1,3247
Вода (водорода окись)		647,30(5)	22,12(1)	0,32(1)	**56,r**	0,5524
бромистый	HBr	362,95 (20)	8,51 (E	0,807 [22]	100 [22]	0,4514
иодистый	H1	423(1)	8,22(**FA,**	1,09	117	0,6350
селенистый	H^Se	411(1)	8,9	0,349[13]	97,7 [13]	0,5525
сернистый		373,55(10)	9,01 (1)	0,349	97,7	0,4518
фтористый		461 (3)	6.49 (35)	0,29	69	0,9542
хлористый	HC1	324,55 (50)	**8,26(1)**	0,42		0,3720
цианистый	HCN	465,65(50)	5,39 (2)	0,195		1,1281
Водорода перекись [12]		708,5	15,54	0,349	97,5	0,9418
Вольфрам:						
гексафторид	WFe	444(5)	4.4(4)	1,28(3)		1,3195
гексахлорид	WCle	923(3)	4,9(5)	0,94 (3)		5,0040
тетрахлороксид	WOCI4	782(4)	5,3(3)	1.01 (4)		3,3847
грихлороксид	WOCI3	637(3)		0.60(3)		1,7220
Гафний:						
тетрабромцд	HfBr4	746 (6)	4,1(5)	1.20(10)	415	3,9066
гетраиодид	Hfl4	913 (3)	3,9(5)	1,30(10)	530	6,1515
тетрахлорид	HfCr4	724 (2)		1.05(2)	304 [20]	2,6940
Германия тетрахлорид	GeCU	552 (2)	3;85^5)	0,65(1)	330	2,3078
Гидразин	N2H4	653	14,7	0,230 [12]	139 [12]	0,8464
Гидразина тетрафторид		309	3,7 [20]	0,574 f12]	**181 [12]**	0,7427
Дейтерий:						
бромистый	DBr	362,0				
иодистый	DI	421,8				
селенистый	D,Se	412,;				
сернистый		372,25				
хлористый	E g	323,4 [20]				
оксид	D2O	644,05(10)	21,86(3)	0,363	55,1	0,5535
перекись [12]		717	13,9			1,0722
Дейтероаммиак	*X'*	405,45 (30)				
Дейтероарсин		372,0 [20]				
	AsDs	289,85(2)	4,00(2)	0,14(3)	170(10)	**0,6121**
m-1	B^He	272		0,559 [12]	**118 [12]**	0,3736
прстс-1	mpOHc-N^Fg	260		0,584 [12]	113 [12]	0,3537
Дицнан		400(1)	6,0(1)			0,7805
Железа пентакарбонил		563(10)				
Молибден:						
гексафторид	MoFe	473(5)	4,8(4)	0,93 (3)		1,3700
пентахлорид	M0CI5	850(3)	5,3(5)	0,74 (3)		
Мышьяка трихлорид	AsCla	654,45(50)		0,720		Ь5426
Никеля тетракарбонил	Ni(CO)4	473 (10)	2,0(5)	0.5(1)		3,2196

			Ркр.			
Ниобий:						
пентабромид	NbBfs			1,05(4)	469	4,4264
пентахлорид	NbCb		4,88(11)	0,68(4)	397	3,8551
пентафторид [20]	NbFs		6,3	1,21	155	2,5215
Нитрозил:						
фтористый [12]	NOF	[20]		0,595	82,3	0,4459
хлористый	NOCl		9,36 [21]			0,6030
Нитронил фтористый	NO2F			**0,602**	108	0,3821
Оксонитротрифторид [12]	NOF_3		*ИГ*	0,593 [20]	169 [20]	0,4158
Олова тетрахлорид	SnCU			0,742(5)	351	2,7285
Перхлорилфторид	$FClO_3$		3,744(5)	0,637	161	0,7380
Рений:			5.4			
оксид				1,45(3)	334	3,7558
оксохлорид			4,91 (25)	0,95(2)		3,6289
Ртуть:						
дибромид						
дииодид						
дихлорид			11,52 (40)	1,555(60)	174,6	2,3916
Селена тетрафторид	**Sfi-**					
Селеноуглерод	**g -**		7,0(1,0)	0,85(8)	**200**	
Сероуглерод			7,90(2)	0,44(1)	173	
Сера:						
гексафторид		318,70 (1)	3,759	0,732		0,7879
двуокись	**IS;**	430,65 (20)	**7,88(1)**	0,524 (5)		**0,6821**
пентафторидхлорид		117,7 (2)				
тетрафторид	**i f**	364 [20]				
трехокись		491,15 (50)	8,21 (5)	0,633	126	0,8571
трифторонитрид			6,9	0,615	167,5	0,6274
фторонитрид	NF^-SFs		3,3			1,7143
Силан:	SiH4		4,28(15)	0,309	104(10)	0,4972
бромид	SiHjBr		5,64(15)	0,627	177 (10)	1,0650
дибромид	SiH^Bra		5,30(15)	0,772	246(10)	1,6647
дииодид	SiH^Ig		6,68(15)	1,224	232(10)	1,8996
дифтордихлорид	SiFaCla		3,500 (5)			1,1341
дихлорид	SiH^Cla		4,53(15)	0,515	196(10)	1,4223
иодид	SiHgl		6,94(15)	0,988	160(10)	1,1144
тетрабромид	SiBr4		4,18(15)	0,872	398(10)	2,9989
тетраиодид	**Sil4**		4,26(15)	1.417	378(10)	4,9393
тетрафторид	SiF4		3,714(5)			0,5266
тетрахлорид	SiCU		3,75(15)	0,584	291 (10)	1,9916
трибромид	SiHBrg		4,70(15)	0,768	350(10)	2,3081
трииодид	SiHIs		5,93(15)	1,326		2,8417
трифторхлорид	SiFsCl		3,465(5)			0,7964
трихлорид	SiHCls		4,17(15)	0,533	254(10)	1,7117
фтортрихлорид	SiFCls		3,600 (5)			1,5569
хлорид	SiHsCl		4,81(15)	0,444	15000)	1.0136
Сурьма:						
трибромид	ЗЬВгз					
трииодид [21]	Sbis		0,23			
трихлорид	SbCls			0,842		
Тантал:						
пентабромид	TaBrs				461	4,1956
пентахлорид	TaCl5		4,3(5)		401	3,9376
Титана тетрахлорид	TiCJ4		4,7 [20]		336	2,5468
Углерод:						
двуокись	C02		7,387(5)			0,3652
окись	CO		3,499(5)			0,1473
селеноокись	COSe					
	COS				140 [20]	0,6649
	H^CO3				135	0,3658
Урана гексафторид			4,59 (6)			1,6139
Фосфин	PH_3		6,54 (4)		113,5 [21]	0,4697
Фосфоний хлористый	PH_4Cl		7.37(4)			0,4111

продолжение табл. 13.5

Вещество	Формула	^КР, к	Ркр.	Ркр.	''КР. см»/моль	НМ* ' моль''	b, см'/моль
Фосфонитрилфторид:							
тример	**[PNF2]3**	**460,85**	–	–	–	•–•	–
тетрамер	[PNFd4	496,35	–	–	•–.	–	–
пентамер	[PNF,]**S**	523,95	–	–	–	–	–
Фосфор:							
дифторхлорид	PF^Cl	362,32 (5)	4,520	—	—	0,8470	83.303
пентахлорид	PCls	645,15 [22]	–	–	–	–	–
тридейтерид	**POз**	323,6 [20]	–	–	–	–	–
трифторид		271,10(2)	4,325	–	–	0,4955	65,134
трихлорид	PCI-	563,15	–	0,520	264	1,3906	88,000
фтордихлорид	PFClo	462,99(5)	4,99	–	–	1,2514	96,322
Фтора оксид	F,0	215.,5(1)	4,96	0,553	97,6	0,2733	45,200
Фторимин	NHFg	403	9,4	–	–	0,5026	44,445
Хлор:							
оксид [12]	c i p	465	6,58	0,520	167	0,9589	73,487
пентафторид [12]	ClF5	415,75	5,26	0,56 [20]	231	0,9585	82,161
трифторид [12]	ClF3	447,5	5,8	-	–	1,0112	80,523
Цирконий:'							
бромид	ZrBr^	805 (6)	4,3 (5)	0,97(10)	420	4,3374	192,01
иодид	Zrl4	959 (6)	4,1 (5)	1,13(10)	530	6,4560	239,90
«лорид	ZrCl4	778 (2)	5,91 (15)	0,73 (2)	319	2,9881	136,87

Таблица 13.6. **Критические параметры и постоянные Ван-дер-Ваальса органических веществ. В круглых скобках указана погрешность приведенного значения, фр. — фреон**

Вещество	Формула		Ркр-	Ркр. г/см»		МПа2	b, см7мвль
		Углеводороды [23]					
Амилбензол [21]		678,9	2,65	0,284		5,0629	265,77
Бензол '		562,6 [24]	4,92 [24]	0,304 [24]	259	1.8744	118,73
1,3-Бутадиен (дивинил)	**I ' l "**	425	4,33	0,245	221	1,2175	102,08
н-Бутан	***c&***	425,16	3,797	0,228	255	1,3884	116,38
1-Бутен		419,6	4,02	0,234	240	1,2764	108,40
1(ис-2-Бутен		435,55	4,20	0,240	234	1,3156	107,64
трснс-2-Бутен		428,61	4,10	0,236	238	1,3055	108,54
н-Бутилбензол		660,4	2,887	0,270	497	4,4058	237,75
шор-Бутилбензол [21]	**II"**	645	2,72	0,264	–	4,4510	245,93
трет-Бутилбензол [21]		639,6	2,72	0,274	–	4,3768	243,87
1-Бутин (этилацетат)		463,6	–	–	–	–	–
2-Бутин (диметилацетат)		488,6					
н-Гексадекан [24]		725,15	1,42	0,24	924	10,810	531,25
1,5-Гексадиен		507	–	–	–	–	–
Гексаметилбензол	**1i'**	767	–	–	–	–	–
н-Гексан		507,4	2,97	0,233	370	2,5289	177,62
1-Гексен		503,98					
н-ГеПтадекан [24]		735,15	1,32	0,24	1001	11^65	580,01
н-Гептан		540,2	2.735	0,232	432	3,1107	205,21
1-Гептен	C,Hi4	537,23			–	–	–
Дейтерометан [9]		189,2(1)	4,66(1)	0,205 (2)	97,7	0,22397	42,1858
чис-Декагидронафталин [21]	CD^	677	2,49	0,247	—	5,3621	282,26
транс-Дек агидронафталин	CioHig	664	2,61	0,254 ^	_	4,9182	263,97
н-Декан [24]		619,5	2,11	0,236	602	5,3104	305,48

i 1	3 § § § *i*
я 1	еч W CO CO CO co" COCO'(N WW IN — w <N (N (N (M" ^"^"^"-^"OCOCOCOCO COC5 —— — WW ^"CO'CO W'W"—"CO'CO'W'W'-^'S'-^'SCO" OT-T—"
i t	i ! 1 1 1 1 1 1 12 1 ' ' w S | | | ' = '
1	s i s i i j ^ l s Й & 1 i i l p . i i i i i o ' o ' o o o o o o o o o o o o o" o o o o d' d' d' o o o o d' d' d' d' o o ' o o o cэ o o" o o o' o' cэ o o" o o o o
c s	p. 1 I p ^ p i ^ g g . W L C O ^ i i i s co'co'w w'w w'w W w'w'w WCO co" CO co CO CO CO<NW W — co'co'cococo'^cococococow'w'w W co'coco'i-'w'wco'co-^ — W — W — COT*
« J	s *miiEiiiiiiB i i i i i*
i *1*	
1	ftlilislllllltj ША lllfiliiiJiiiiillliiplliLii! 1 i l l l l l l l l l l l 1 1 Щ w'w'w'w'wwco'cow'ww'cow' B- 1" i- 1" — — i s s §Swc!<we4cowco

/{ис-2-Пентен		476	3.6			1,8114
транс-2-Петен		475	3.6			
1-Пентин (пропилацетилен)		493.4				
Пропадиен (аллен) [24]	C3H4	393,85	5,25			0,8619
		369,82	1,514	0,217		2,6347
П|ропен (пропилен)		365.0	4,62	0,233		0,8409
и-Пропилбензол		638,30	3,200	0,273		3,7132
Пропин (метилацетилен)	I	402,38	5,526	0,245		0,8544
н-Тетрадекан		695	1,678	0,24		8,3949
1, 2, 3, 4-Тетрагидронафталин [21]		719	3,52	0,309		4,2876
1,2, 3, 4-Тетраметилбензол [21]	CioHi4	700.1	3,27	0,308		4,3673
1, 2, 3, 5-Тетраметилбензол [21]	CioHi4	**686,8**	3,21	0,308		4,2824
1, 2, 4, 5-Тетраметилбензол	CioHi4	675	2,9	0,306 [21]		4,5219
2,^2,^1 3-Тетраметилбутан	CsHis	567,8	2,87	0,248	**461**	3,2788
2, 2, 3, 3-Тетраметилгексан	CioHaz	623	2,510			4,5098
2, 2, 5, 5-Тетраметилгексан [25]	C10H22	581.5	**2,186**			4,5119
2, 2, 3, 3-Тетраметилгептан			2,741			3,9280
2, f f k 4-Тетраметилгептан |25|	CllH24		**2,602**			3,9358
2, 2, 4, 4-Тетраметилгептан	CiiH,4	574,6	2,485			3,8754
2, з!з, 4-Тетраметилгептан [25]	**СЦН24**	607,5	2,716			3,9634
Толуол (метилбензол)		591,72	4,109	0,292		2,4851
и-Тридекан [21]		677.2	1,778	0,24		7,5208
1.2, 3-Триметилбензол		664,45	3,454	0,28 [21]		3,7274
1, 2, 4-Триметилбензол	Ш	649,05	3,232	0,28 [21]		3,8008
1.3, 5-Триметилбензол		637,28	3,121	0,28 [21]		3.7951
2, 2, 3-Триметилбутан		531,1]	2,954	0,252		2,7851
2,2, 5-Триметилгексан		568,0				
3, 3, 5-Триметилгептан [25]		609.5	2,310			4,6894
2, 2, 3-Триметилпентан		563,43	2,730	0,262		3,3915
2, 2, 4-Триметилпентан (изооктан)		543,89	2,568	0,244		3,3599
2, 3, 3-Триметилпентан	CsHis	573,49	**2,820**	0,251		3,4013
2, 3, 4-Триметилпентан		566,34	2,730	0,248		3,4266
орт е-Трифенил		891,0	3,901	0,306		5,9348
лета-Трифеиил	Й :	924.8	3,506	0,300		7,1142
пара-Трифенил	CisHie	926,0	3,324	0,302		7,5241
н-Уидекан [21]		642.6	1,958	0,237		6,1515
Циклогексан		553,4	4.07	0,273		2,1926
Циклогексен	CeHio	560.41	4,24 [21]	0,288 [21]		2,1624
Циклооктан [26]		604.3	3,81			2.7952
Циклооктан [26]		647,2	3,55			3,4442
Циклопентан	I s "	511,6	4,508	0,27		1,6932
Циклопентен [21]	GA-	504	4,55	0,277		1,**6282**
Циклопропан	G S	397,80	5,495			
Цимол		658 [13]				
Эйкозан		775		0,24	1176	15,715
Этан [9]		305,45(10)	4,87(1)	0,203 (5)	148	0,5571
Этен (этилен) [9]	C2	282,36	5,066(2)	0,227 (5)	124	0,4589
Этилбензол	CsHiL	617.09	3,609	0,284	374	3.0769
3-Этилгексан		565.42	**2,608**	0,251	455	3,5747
3-Этилпентаи		540,57	2,891	0,241	416	2,9479
орто-Этилтолуол [21]	**C9H12**	653	3,1	**0,28**	430 [13]	3,9587
жта-Этилтолуол [21]	С9НИ	636	3,1	**0,28**	430 [13]	3,7553

					UkP, см3/ыоль		
поро-Этилтолуол [21]	С Л .			**0,28**	430 [13]	3,7553	
Этилциклопентан		569,45	3,398	**0,262**	375	2,7835	
Этин (ацетилен) [9]		308,33(1)	6,24(1)	0,232(1)	112	0,4442	
	Кислородсодержащие соединения \23]						
Анизол (метилфениловый эфир)	е л о	641	4,18	_	_	2,8703	159,57
Ацетальдегид [9]	С2Н4О						
Ацетон	СзНбО		4,70	0,278	209	1,6020	112,34
Бензальдегид		625	2,18	0,330 [27]		5,2291	298,16
1-Бутанол	Q Н ° 0		4,413	0,270	274	2,0942	132,58
2-Бутанол	С4Нюо	535,95	4,194	0,276	268	1,9974	132,81
трет-Бутанол	С4Н10О	506,2	3,972	0,270	275	1,8813	132,45
к-Бутилацетат		579					
Валериановая кислота		651		–	–		
Винилэтиловый спирт		475	4,07			1,6154	121,19
1-Гексанол		610		0,268	381	2,1739	127,00
1-Гептанол		633	–	0,267	435	2,3980	135,00
Дейтероуксусная кислота [9]		594,1 (1)					
Дейтероэтанол [9]		514,9(1)	–				
1-Деканол		700		0,264	600	3,9285	200,00
Диизопропиловый эфир		500	2,88	0,265	386	2,5336	180,57
Диметилоксалат		628	3,98				
Диметоксиметан		497					
1 , 2-Диметоксиэтан	С4Н,о	536	3,87	0,333	2Л	2,1646	143.91
1, 4-Диоксан		587	5,48	0,370	238	1,8331	111,29
Дифениловый эфир [24]	**1**	805,15	3,57	–	–	–	–
1, 1-Диэтоксиэтан (ацеталь)		527					
Изоамилацетат		509					
Изобутанол	С4Н10О	547,73	4,295	0,272	273	2,0369	132,53
Изобутилацетат [21]	СеНхгОг	561	3,1	0,281		2,9218	185,61
Изобутилбутират		611			**Е**		
Изобутилизобутират		602					
Изобутилвалерат	с М о !	621					
Изобутилпропионат		592					
Изобутилформиат		551	3 >	0,29	350	2.2815	147,56
Изовалериановая кислота		634					
Изомасляная кислота		609	4,05	0,302	***т***	2,6686	156^16
Изопентилбутират		619					
Изопентилпропионат		611					
Изопентилформиат	***Шк***	578					
2, 3-Ксиленол		722,8					
2, 4-Ксиленол		707,6					
2, 5-Ксиленол		723,0					
2, 6-Ксиленол		701,0					
3, 4-Ксиленол	СвНюО	729,8					
3, 5-Ксиленол		715,6			—		
орто-Крезол		697,6	5,01	0,375[21]		2,8353	Ш,84
жето-Крезол		705,8	4,56	0,357[21]	310	3,1861	160,87
поро-Крезол		704,6	5,15	0,347 [21]	–	2,8127	142,26
Масляная кислота		628	5,27	0,304	290	2,1828	123,87
Метанол [9]		513,15(30)	7,95(5)	0,272(5)	118	0,9654	67,047
Метилацетат		506,8	4,69	0,325	228	1,5966	112,27
2-Метил-2-бутанол		545					
3-Метил-1 - бутанол		579,40					
3-Метил-2-бутанон		553,4	3,85	0,278	310	2,3195	149,37
Метилбутират		554,4	3,48	0,300	340	2,5791	165,78
Метилвалерат [21]		567	3,2	0,279	–	2,8914	181,73
Метилизобутират		540,8	3,44	0,301	339	2,4830	163,62
Метиллаурат		712					
Метиловый (диметиловый) эфир		400,05(10)	5,37 (5)	0,238 (15)		0,8691	77.418

		''кр. К	МПа	Ркр,	см=/моль	Н-м^ моль2	*b,* см^моль
4-Метил-2-пентанон	CeHi^O	571	3,27	—		2,9052	181,32
Метилпропионат		530,6	4,004	0,312	282	2,0503	137,71
2-Метил гетрагидрофуран		537	3,76	0,322	267	2,2371	148,46
Метилформиат [9]		487.15(10)	5,998 (5)	0,349 (5)	172	1,1538	84,400
2-Метилфуран	**SITS-**	527	4,72	0,333	247	1,7153	115,99
Метилэтилкетон (бутанон)	CjHsO	535,6	4,15	0,270	267	2,0138	133,99
Метилэтиловый эфир	CgHgO	437,8	4,40	0,272	221	1,27107	103,46
1-Нонанол	CgH,,,0	677	–	0,264	546	3,4575	182,00
1-Октанол	CgHigO	658	–	0,266	490	3,0158	163,33
2-Октанол	CsHisO	637			Z	Z	Z
Паральдегид	CeHi,03	563	—	—			
1-Пентанол	CBHl^O	586	–	0,270	326	**1,7869**	108,67
2-Пентанон	CbHioO	564	3,89	0,286	301	**2,3842**	150,64
3-Пентанон	CsHioO	561,0	3,74	0,256	336	2,4548	155,93
к-Пеитилформиат		576					
ЬПропанол		536,71	5,170	0,275	218	1,6250	107,90
2-Пропанол	**CgHeO**	508,31	4,764	0,273	220	1,5816	110,88
н-Пропилацетат		549,4	3,33	0,296	345	2,6405	171,28
«-Пропилбутират		600					
к-Пропилизобутират		589					
«-Пропилизовалерат							
Пропилена окись			4,92	0,312	186	1,3769	101 ,"76
н-Пропилпропионат	CeHi^Oa	578	–	–	–		
Пропионовая к1ус:лота	CзHeOr	612	5,37	0,32	230	2,0339	118,43
Пропилформиат	C4HO,	538,0	4,06	0,309	285	2,0774	137,61
Тетрагидрофуран	C4H,0	540,2	5,19	0,322	224	1,6404	108,22
Уксусная кислота [9]	C2H4O2	594,75(10)	5,786 (5)	0,351 (50)	171	1,7829	106,83
Уксусный ангидрид		569	4,68	–	–	2,0169	126,32
Фенетол (этоксибензол)		647	3,42	–	–	3,5645	196,33
Фенол		694,2	6,13	0,401 [21]		2,2926	
Фуран	c ^ o	490,2	5,50	0,312	218	1,2737	921592
Циклогексанол	CeHiaOa	625	3,75	–	–	3,0386	173,25
Циклогексанон	CHIOO	629	3,85	–	–	2,9966	169,77
Этанол [9]	***C,H,0***	516(2)	6.4(1)	0,276(5)	167	1,2164	84,006
Этилацетат		523,2	3,83	0,308	286	2,0843	141,96
Этилбутират [21]		566	3,0	0,276	410	3.0733	193,51
Этилвалерат		570					
Этилена окись [9]		468(1)	7,19(1)	0,32(1)	138	0,8878	67,607
Этилизобутярат	CeHi^Oa	553	3,0	0,28	410	2,9938	189,06
Этилизовалерат	QHuOa	588					
Этиловый (диэтиловый) эфир	C4H,,o	466,70	3,638	0,265	280	1,7462	133,33
Этилпропиловый эфир	C5H120	500,6 [21]	3,25	0,36	240	2,2469	159,95
Этилпропионат	C5HioO2	546	3,362	0,296	345	2,5859	168,78
орто-Этилфеисл	CsH.oO	703,0					
жтй-Этилфенол	QHioO	716,4					
псра-Этилфеиол		716,4					
Этилформиат		508,4	4,74	0,323		1,5895	111,42
Этиловый эфир нонановой кислоты		674					
Этиловый эфир октановой кислоты			-	-	-	-	-
		Галогеносодержащие соединения [23					
Бензотрифторид [21]		562,6	3,56	0,427	342	2,5954	164,40
Бромбензол		670	4,52	0,485	324	2,8968	154,08
Бромметан [12]	**A**	464	6,94	–	206	0,9045	69,475
Бромтрииодметан [9]	CBrГз	750					
Бромэтан [9]		503,85(1,5)	6,23(5)	0,507	215~	1,1881	84,029
Гексафторацетон		357,2	2,84	–	–	1,3115	130,84
Гексафтордихлорпропан [28]		449	2,99	0,62	356	2,0077	159,35
Гексафторэтаи	**S F -**	292,85 (50)	3,3	0,617	224	0,7479	91,0196

	Формул			Ркр,	
орто-Дибромбензол [21]		761,75	4,22	0,645	4,0144
Дибромметан [28]		583	7,2	0.525	1,3778
1,1-Дибромэтилен [9]		582,95(1,5:	7.15 (8)		1,3854
Дииодметан [34]		605,7	6,47	0,840	
Дифторбромметан [9, 34]	CHFju	409		0,750	
Дифтордибромметан [9]	CF,Br,	464	4*22	0,866 [34]	1,4867
Дифтордииодметан [9]	***CF^h***	477			
Дифтордихлорметан (фре-	CF.Cl,	384,65 (20)	4^1(1)	0 ,555 (5)	1,0753
Дифториодметан [9]	CHF				
Дифторметан [9]	CH	459	5,83(5)	0,430 (50)	0,6182
!, 2-Дифтор-1, 1,2, 2-тетра- хлорэтан [34]		351,55 (20) 551		0,569	
Дифторхлорбромметан [28]	CFaClBr		4,310	0,741 [34]	245,7 [12] 1,2396
Дифторхлорметан (фреон-22)	CHFjCl	369,55 (50)	4,91 (5)	0,525(10)	165 0,8104
1, 1-Дифтор-2-хлорэтилен [9]		400,6 (5)	4,46 (7)	0,4	197 1,0497
1, 1-Дифтор-1-хлорэтан [9]		410,25 (50)	4,12(7)	0,435	231 1,1902
1, 1-Дифторэтан [9]		386,65 (70)	4,49(7)	0,365	181 0,9713
1, 1-Дифторэтилен [9]		302,85 (2)	4,46(1)	0,414(2)	155 0.5993
орто-Дихлорбензол [21]		697 [28]	4,10	0,408^	360 3,4522
же/ло-Дихлорбензол [21]	QHFjCl	684	**3,88**	0,415	3,5156
пора-Дихлорбензол [21]		684,75	3,90	0,395	3,5050
Дихлорбромметан [34]		585,43	5,60	0,712	
Дихлордибромметан [34]		**668,21**	4,84	0,793	
Дихлорметан [9]		510 (2)	**6,1(1)**	0,472(25)	1,2477
1, 1-Дихлорэтан [9]		523 (5)	5,1 (3)	0,308	321 1,5745
1, 2-Дихлорэтан [9]		561 (2)	5,4(3)	0,44(3)	225 1,7091
1, 1-Дихлорэтилен [12]		494,15	5,23		220,3 1,3619
Чмс-1, 2-Дихлорэтилен [12]	CCl^Br^	544,15	5,86		220,3 1,4743
транс-1, 2-Дихлорэтилен [9]	**ѕ**,**ѫ**,**ḋ**l.	516.5	5,52		220,3 [12] 1,4088
Иодбензол		721		0,581	351 3,3546
Иодметан [9]		528		0,83	171 0,8445
Пентафторбензол		532,0	3,52		2,3475
Ш-Пентадекафторгептан	C.!hfi5	495,8			
Пентафторбромбензол		670	4,52		2,8968
1,1, 2-Пентафторпропан		380,11	3,137	0,491	1,3431
Пентафторхлорацетон	C3F5C10	410.6	**2,88**		1,7086
Пентафторхлорбензол	CeFbCl	571.0	3,22		2,9509
Пентафторхлорэтан (фреон-115) [9]	C2F5C!	353.1 (1)	3,157(51)	0,613(4)	1,1516
Перфторбензол		516,72	3,304	0,493 [29]	2,3565
Перфтор-н-бутан		386,4	2,323	0,629	1,8740
Перфтор-2-бутилтетрагидрофуран		500.2	1,607	0,707	4,5404
Перфтор-к-гексан		447,6	**1,905**		3,0671
Перфтор-1-гексен		454,4			
Перфтор-н-гептан		474,8		0,584	4,0552
Перфтор-1-гептен		**478,2**			
Перфтор-к-декан	**i•**	542	1,45		5,9125
Перфторметилциклогексан	**i**	488,6	2.3		2,9872
Перфторнафталин		673,0			
Перфтор-«-нонан		524	1*^6		5,1316
Перфтор-к-октан		502	1,**66**		4,4225
Перфтор-к-пентан		422	2.04		475 [30] 2,5500
Перфтор-н-пропан	**I**	345,0	**2,680**	**0,628**	299 1,2952
Перфторпропилен		358	3,36	0,6 [31]	**1,1110**
Перфторциклобутан		388,37	2,777	0,616	325 1,5838
Перфторциклогексан		457,2	2,4		2,5067
Перфторциклогексен		461,8			
Тетрафтордихлорэтан [24]		418,95	3,38	0,583	1,5125
1, 1,2, 2-Тетрафтор-1, 2-дихлорэтан		418,8	3,26	0,582	***m*** 1,5677

				cm¹/^DV		
1,2,2, 2-Тетрафтор-1 , дихлорэтан [9]	418,65(5)	3,30 (7)	0,582(10)		1,5474	
Тетрафторэтилен [9]	306(1)	3,95(10)	0,58(1)	172	0,6910	
Тетрахлорацетилен [9]	642(10)	3,95(30)	0,503(15)	334	3,0417	
Тетрахлорэтилен [12]	613.2	4,48			2,4483	
Трибромметаи [34]	684,94	5,91				
Ш-Тридекафторгексан	471.8					
Триодметан [9]						
Трифторбромметан	340	3,97	0,76	200		
Трифториодметан [9]	359					
Трифторметан (фреон-2 [9]	299,05(50)	4,86(10)	0,5Ж(10)	***Ш***	0,5362	
Трифторпропилен [31]	376	3,92	0,455		1,0514	
1,1,2-Трифтор-1, 2,2-трихлорэтан [9]	487,25(50)	3,415(20)	0,576(10)	ЗЖ	2,0276	
Трифторуксусная кислота	491.3	3,258	0,559	204	2,1608	
Трифторхлорметан [9]	301,95(20)	3,95(5)	0,58(1)	180	0,6728	
Трифторхлорэтилен [9]		4,05(10)	0,55(1)	212	1,0335	
1, 1, 1-Трифторэтан (фреон-143) [9]	34^25(50)	3,76(7)	0,434(10)	193	0,9301	
1.2,4-Трих5.орбензэм, [28]	735,0		0,472		3,9563	
Трихлорбромметан [34]	602,46		0,697			
Трихлориодметан [9]	607					
1,1, 1-Трихлорэтан [9]	550(10)	1.46 (30)	0,464(1.5)			
Трихлорэтилен	571,15			256,1	1,9438	
Углерод:						
четырехбромистый	715 [9]					
четырехиодистый	740 [9]					
четырехфтористый (фреон-14)	227.7	3,745	0,647	136	0,4044	
четыреххлористый [9]	556,25(50)	4,56(2)	0,558(10)	276		
Ш-Ундекафторпентан	444,0					
Ш-Ундекафторциклогексан	477,6					
Фосгеи [9]	455(1)	5,67(10)	0,52(1)	190	1,0640	
Фторбензол	560.09	4,551	0,269	357	2,0104	
Фторбромметан [34]	468	6,11	0,674			
Фтордибромметан [34]	543,5	5,49	**0,880**			
Фтордихлорбромметан [9] (фреоя-21)	520 451,65(50)	5.17(10)	0,522(10)	197	1,1512	
Фторметаи [9]	317,75(50)	5,88 (5)	0,300 (5)	113	0,5010	
Фтортрибромметан [9]	591					
Фтортрихлорметан (фреон-	471,15(50)	4.38(5)	0.554(10)	248	1,4789	
Фторхлорбромметан [34]	507,5	5,35	0,707			
Фторхлордибромметан [9]	570					
Фторхлорметан [34]	424,83	6,00	0,443			
1-Фтор-2-хлорэтан [9]	520(15)	5,37(30)	0,40 (2)		1,4684	
Фторэтан [9]	375,31 (50)	4,72(5)			0,8700	
Фторэтен (винилфторид)	327.8	5,24	0,320	144	0,5982	
Хлорбензол	632.4	4,52	0,365	308	2,5808	
Хлорбромметан [34]	555.5	6,32	0,669			
Хлордибромметан [34]	654,4	5,75	0.83			
Хлорметан (|реон-40) [9]	416,25	6,60(1)	0,353(10)		0,7660	
	536,55	5,47 (20)	0,50(3)		1,5344	
^ Х ^ ^ й и ы й [9]	535,9(					
Хлорпропан	503	4,58			1,6110	
3-Хлорпропен	514					
Хлортрибромметан [34]	674,67	5,02	0,968			
Хлорэтан [9]	460,35 (50)	5,27(5)	0,331		1,1729	
	Азотсодержащие соединения \23]					
Анилин	699	5,31	0,34	270	2,6837	
Ацегонитрил	548	4,80	0,237	173	1,8120	117,f
Бензонитрил	690,4	4,22			3,2977	170.22

Продолжение табл. 16. 12

Вещество	Формула	^КР, к	РКР. '«ПЭ	РКР,	^КР, см'/моль	НМ« моль»	Ь, СММЭП
к-Бутиламин	**C^H^N**	**524**	**4,15**	—	—	**1,9275**	**131,08**
Бутиронитрил	**C4H,N**	**582,2**	**3,79**	–	–	**2,6084**	**159,67**
Диметиламин **[9]**	**C^HjN**	**437,65(50)**	**5,31 (5)**	–	–	**1.0520**	**85,664**
N, Л'-Диметиланилин	**QH^N**	**687**	**3,63**			**3,7944**	**196,82**
N, **Л/-Диметил-орто-толуидин**	**CSH,4N**	**668**	**3,12**	–	–	**4,1698**	**222,45**
Ди-к-пропиламин	**CeH.sN**	**550**	**3,1**	**0,24**	**300**	**2,8085**	**181,97**
Диэтиламин **[9]**	**C4HuN**	**496,35(50)**	**3,71 (5)**	–		**1,9373**	**139,09**
Изоксазол	C_3H_3NO	**552,0**		–			
Изохинолин		**803**				**3,4688**	**198,74**
Капронитрил	**CioHi^N**	**622,0**	**3,25**				
2, 3-Лутидин	**QHgN**	**655,4**	–	–	–	–	
2, 4-Лутидин	C,H,N	**647**	–	–			
2, 5-Лутидин	QH^N	**644,2**	–	–			
2, 6-Лутидин	QHeN	**623,8**	–	–			
3, 4-Лутидин		**683,8**	–	–	–	-	–
3, 5-Лутидин	C H N	**667,2**					
Метиламин **[9]**	CH_5N	**430,05 (50)**	**7,46(5)**	**0,223 [28]**	**25Ч28]**	**0,7232**	**59,930**
Л'-Метиланилин	C_7HgN	**701**	**5,20**	–	–	**2,7569**	**140,15**
Метилгидразин	CHoN,	**567**	**8,035**	**0,170**	**271**	**1,1668**	**73,335**
Нитродейтерометан **[9]**	**CDsNOo**	**587,0**	–				
Нитрометан **[9]**		**588(1)**	**6,31 (7)**	**0,352(10)**	**173**	**1,5972**	**96,804**
а-Пиколин		**621**					
Р-Пиколин	**QH1N**	**645**	—			—	—
7-Пиколин		**646**	–	–			
Пиперидин	**СбНпЫ**	**594,0**	–	—	—		—
Пиридин	C_5H_5N	**620,0**	**5,63**	**0,312**	**254**	**1 9898**	**114,37**
Пиррол	C_5H_5N	**639,8**	–	–	–		
Пирролидин	**C4HeN**	568,6	**5,61**	**0,^6**	**249**	**1,6796**	**105,27**
и-Пропиламин	QHsN	**497,0**	**4,74**			**1,5191**	**108,92**
Пропионитрил	C_3H_5N	**564,4**	**4,185**	**0,240**		**2,2199**	**140,16**
орто-Толуидин	C,HeN	**693**	3,75	–	–	3,7357	**192,10**
жето-Толуидин	C,H«N	**709**	**4,15**			**3,5287**	177,36
поро-Толуидин	C,H,N	667	**2,38**			5,4487	291,11
Триметиламин [9]	CsHsN	433,30(10)	**4,078 (5)**	0,233(3)	254	1,3428	110,44
Триэтиламин [9]	**CeHisN**	532(10)	3,0(5)	0,26	390	2,7152	**181,88**
Хинолин	CsH,N	782	–	–			
Этиламин [9]	C H N	456,35 (50)	5,62(5)	**0,243**	185	**1**,0800	**84^35**
Этиленднамин [9]		539(5)	6,3(3)	**0,29(1)**	206	1,6324	**98,099**
		Серосодержащие	***соединения*** (231				
Диаллилсульфид		**653**					
Диметилсульфид [9]		503,05 (50)	5,53(2)	0,309	201	1,3339	94,498
Диэтилсульфид [9]	**QH1S**	556,95(50)	3,96 (5)	0,279	323	2,2833	146,10
Изопентилсульфид		664	–	–			
Метилмеркаптан	1C	**470,0**	**7,24**	0,332	145	0,8904	67,515
Метилэтилсульфид		553	4,26			2,0956	135,04
Тетрагидротио(),**№H**	QHgS	632,0					
Тиофен		**579,4**	5,695	0,385	**219**	1,7192	105,74
Этилдисульфид	C'H'**I**	642					
Этилмеркаптан [9]	C2H5S	498,65(50)	5,49 (5)	0,300	207	**1**,3204	94,362
		Кремтйорганпческие	***соединения***	[32]			
Дилетилдихлорсилан	C^HeCUSi	520,35	3,49			2,2654	
Триметиллихлорсилан	C3H,ClSi	497,75	3,20	O,'297		2,2565	
Триэтилхлорсилан	C,H5Cl3Si	559,95		0,406		2,7429	
Даутерм (48% дибензила, 58% нафталина)							
Даутерм (73,5% дифенилового эфира, 26,5% дифенила)						4,5037	200,38

ираметрами вещества) и при которых уравнение со-;тояния вещества удовлетворяет условиям $(\partial P/\partial V)_T = 0$,

Состояние, соответствующее критическим тараметрам, называется критическим состоянием или критической точкой вещества. По современным представлениям критическая точка является изолированной точкой фазового перехода второго рода и одновременно конечной точкой фазового перехода первого рода жидкость—пар [7, 8]. Критическая точка характеризуется рядом физических явлений (исчезновение мениска, так называемая критическая опалесценция, бесконечная сжимаемость, бесконечная теплоемкость при постоянном объеме и т. д.), которые протекают идентично во всех веществах и определяются самыми общими свойствами межмолекулярных сил. В табл. 13.4—13.6 приведены значения критических параметров простых веществ, неорганических и органических соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Жарков В. Н., Калинин В. А. Уравнение состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М.: Наука. 1968.

2. Новикова' С. И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука. 1974.

3. Мейсон Э., Сперлинг Т. Вириальное уравнение состояния: Пер. с англ./Под ред. В. В. Сычева. М.: Мир. 1972.

4. Вукалович М. П., Новиков И. И. Уравнение состояния реальных газов. М.—Л.: Госэнергоиздат. 1948.

5. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей: Пер. спольск./Под ред. П. Г Романкова. М.—Л.: Химия. 1966.

6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/Под ред. В. П. Глушко. — 2-е изд. М.: Изд-во АН СССР. 1962. Т. 1, 2.

7. Фишер М. Природа критического состояния: Пер. с англ. М.. Мир. 1968.

8. Уравнение состояния газов и жидкостей. М.: Наука, 1975.

9. Термические константы веществ/Под ред. В. П. Глушко. Вып. 1—10. М.: Наука. 1965—1982.

10. Ohse R. W., Tippelskirch H.//High. Temp.-High Press. 1977. Vol. 9, K^ 4. P. 367—385.

11. Herreman W.//Cryogenics- 1980 Vol. 2, № 3. P. 133-134.

12. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание. —3-е изд./Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука. 1978—1982. Т. 1—4.

13. Kobe K. A., Lynn R. E.//Chem. Rev. 1953. Vol. 52, № 1. P. 117—236

14. Мартынюк IW. М., Каримходжаев И.//Журн. физ.-хим., 1974. Т. XLVIII, Вып. 5. С. 1243—1245.

15. Seydel U., Риске W.//J. Phys. 1978. Vol. F8. P. L157—L161.

16. Goodwin R. D.//J. Res. NBS. 1970. Vol. 74A2. P. 221—227.

17. Rau H.//J. Chem. Thermod. 1974. Vol. 6, № 6. P. 525—535.

18. Rau H., Kutty T. R. N., Guedes de Carvalho J.// J. Chem- Thermod. 1973. Vol. 5, № 2. P. 291—302.

19. Hoshino H., Schmutzler R. W., Hensel F.// Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1976. Bd 8, № I. S. 27—31.

20. Mathews J. F.//Chem. Revs. 1972. Vol 72, № 1. P. 71—100.

21. Справочник химика. Т. 1/Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Химия. 1963.

22. Свойства неорганических соединений: Справочник/А. И. Ефимов и др. Л.: Химия. 1983.

23. Kudchadker A. J., Alani G. **H.,** Zwolinski B. J.// Chem. Rev. 1968. Vol. 68. P. 659—735.

24. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз. 1963.

25. Ambrose D., Townsend R.//Trans. Farad. Soc. 1968. Vol. 64, № 550, part. 10. P. 2622—2631.

26. Young C. **L.**//Austral. J. Chem. 1972. Vol. 25, № 8. P. 1625—1630.

27. Ambrose D. e. a. //J. Chem. Thermod. 1975. Vol. 7, № 12. P. 1143—1157.

28. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. — 1-е изд. М.: Атомиздат. 1976.

29. Redlich O., Kwong J. N. S. Chem. Rev. 1949. Vol. 44, № 1. P. 233—244.

30. Redlich O. Thermodynamics: Fundamentals, Application Elsevier. Amsterdam, 1976.

31. Beattie J. A., Bridgeman O. C.//J. Amer. Chem. Soc. 1927. Vol. 49, No 7. P. 1665—1667.

32. Benedict N., Webb G. B., Rubin L. C.//J. Chem. Phys. 1940. Vol. 8, № 4. P. 334—345.

33. **Таблицы** стандартных справочных данных. ГСССД 49—83. М.: Изд-во стандартов. 1984.

34. Перельштейн И. И., Парушин Е. Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1984.

ГЛАВА 14

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Б. Д. Сумм

14.1. ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное иатяжеиие представляет собой основиую термодинамическую характеристику поверхностного слоя жидкостей и твердых тел иа границе с различными фазами (газами, жидкостями, твердыми телами). Поверхностное натяжение обусловлено межмолекулярными (межатомными) взаимодействиями. Оио возникает потому, что на поверхности молекулы взаимодействуют не только с соседними молекулами данной фазы (как в ее объеме), но и с ближайшими молекулами соседней фазы.

Поверхностное натяжение а имеет два определения [1. 2]:

энергетическое — удельная свободная поверхностная энергия, Дж/м^;

силовое — сила, которая обусловлена межмолекулярными взаимодействиями и действует на единицу длины контура, ограничивающего поверхность данной фазы, Н/м. Эта сила направлена тангенциально (по поверхности) и перпендикулярно ограничивающему контуру.

Для жидкостей оба определения совпадают. Для твердых тел они не эквивалентны.

Наряду с поверхностным натяжением а в термодинамике используется понятие полной поверхностной энергии е=а+т]7', где т) — поверхностная энтропия; е не зависит от температуры ***Т.***

Для многих однокомпонентных неассоциированных жидкостей (вода, органические вещества, расплавы солей, жидкие металлы) вдали от критической точки зависимость 0(7") близка к линейной: о=оо—0(7—7"о), где ао — поверхностное натяжение при температуре ***Тq-***, температурный коэффициент а»0,1 мДж/(м^-К) в достаточно широком интервале температур. При критической температуре а=0.

Поверхностное натяжение входит во многие уравнения физики, физической и коллоидной химии, электрохимии, оно определяет следующие величины [I—4].

1. Капиллярное давление Pjf жидкости. Па, под искривленной поверхностью (уравнение Лапласа):

(1)

где Гх и Г2—главные радиусы кривизны. Для выпуклой поверхности г>0, для вогнутой г<0, В случае сферической поверхности ***Рк=±2а/г,*** где ***г*** — радиус сферы.

2. Краевой угол смачивания 8, образуемый жидкостью возле поверхности твердого тела (уравнение Юнга):

(2)

где От и Ош — поверхностное натяжеиие твердого тела и жидкости на границе с окружающей средой; Отж — поверхностное натяжение на границе твердое тело — жидкость;

3. Давление насыщенного пара ***Рг,*** Па, над искривленной поверхностью жидкости (уравнение Кельвина):

$$P, = Poexp\{2aVJrRT), \quad (3)$$

где ***Vm —*** молярный объем жидкости, м^/моль; ***Ро*** — давление пара над плоской поверхностью. Па; г — радиус кривизны, м; Д=8,314 Дж/(моль-К) — универсальная газовая постоянная;

4. Адсорбцию веществ, самопроизвольно концентрирующихся на поверхности раздела фаз (уравнение Гиббса):

$$\Gamma = - do/ф. \quad (4)$$

где Г — удельная адсорбция (масса вещества, адсорбированного иа единице площади, моль/м^); ц — химический потенциал этого вещества в фазе, из которой оио адсорбируется, Дж/моль. В случае разбавленных растворов

$$\Gamma = \{-rfo/dc) \; c/RT, \quad (4a)$$

где с — молярная концентрация раствора, моль/м^;

5. Состояние адсорбционного слоя поверхностно-ак« тивного вещества на поверхности жидкости (уравнение Фрумкина—Фольмера):

(5)

где я=ао—а — двумерное (поверхностное) давление, Н/м; Оо и о—поверхностное натяжение чистой жидкости и жидкости при наличии адсорбционного слоя; а^ константа (аналог константы Ван-дер-Ваальса), Дж-м"; Л — площадь поверхностного слоя, приходящаяся иа 1 молекулу адсорбированного вещества, м^; 6 — собственная площадь этой молекулы, м^; k — константа Больцмана, Дж/К;

6. Электрокапиллярный эффект (уравнение Липпмана):

$$-dald^f = \quad (6)$$

где ps — плотность поверхностного заряда, Кл/м^; ф — потенциал электрода. В;

7, Дифференциальную емкость двойного электрического слоя ***С,*** Ф:

(7)

8. Равновесную форму (огранку) кристаллов (уравнение Гиббса—Кюри—Вульфа):

$$\ldots = {}^{\circ}ilhi. \qquad (8)$$

где а, —поверхностное натяжение грани кристалла; Л, — ее расстояние от центра кристалла;

9. Работу образования *Wc* критического зародыша при образовании новой фазы (уравнения Гиббса), Дж. При гомогенном образовании:

а) конденсация пара при давлении ***P***

$$W, = le^{aWlz/ЦRT\nP/Po)^} \qquad (9a)$$

где Vm —молярный объем жидкости, м®/моль; Ро — давление насыщенного пара над плоской поверхностью жидкости; Р/Рс—относительное пересыщение;

б) кристаллизация из пересыщенного раствора концентрации с

(96)

где Со — концентрация насыщенного (равновесного) раствора при данной температуре ***T;***

в) кристаллизация из расплава

m

где Гпл — температура плавления; ***Тип—Т=АТ*** — переохлаждение; L— молярная теплота плавления, Дж/моль;

10. Идеальную (теоретическую) Рид и реальную Ррл, Н/м^, прочности твердых тел (уравнения Поляни—Смекала и Гриффитса):

(10а)

$$= \qquad (106)$$

где ***Е*** — модуль Юнга, Н/м^; б — межмолекулярное (межатомное) расстояние; / — длина зародышевой трещины, которая при напряжении Ррл начинает самопроизвольно расти;

И. Длину капиллярных волн на поверхности жидкости (уравнение Кельвина):

$$(И)$$

где р —плотность жидкости, кг/м®; т — период колебаний, с; g — ускорение свободного падения, м/с^;

12. Упругость жидких пленок со слоем поверхностно-активного вещества (уравнение Гиббса):

$$E, = 2\{do/d\ns), \qquad (12)$$

где £s —модуль упругости пленки, Н/м; s — ее площадь, м^;

13. Число Бонда Во, определяющее соотношение гравитационных и капиллярных сил;

$$\mathbf{Bo = (p'-p")g/Vo,} \qquad (13)$$

где р' и р" — плотность жидкости и окружающей среды; I—характерный размер, например диаметр сосуда;

14. Число Вебера We, определяющее отношение сил инерции к капиллярным силам:

$$\mathbf{We} = pvH/cs, \qquad (14)$$

где *V* — скорость течения.

Поверхностное натяжение жидкостей измерено для многих чистых веществ и смесей (растворов, расплавов) в широком интервале температур, давлений, составов жидкости и для различной природы граничной фазы. Для твердых тел измерения От и Отж сопряжены с большими трудностями. Одно из главных затруднений заключается в том, что работа образования новой поверхности твердого тела включает, как правило, дополнительные (необратимые) затраты на пластическую деформацию. Для измерения поверхностного натяжения жидкостей применяют различные методы [1, ***2].***

Необходимо подчеркнуть, что поверхностное натяжение большинства веществ очень чувствительно к наличию примесей в самой фазе и в граничной фазе. Поэтому измерения разных авторов даже одним методом обычно дают неодинаковые значения а для одних и тех же веществ. При отборе данных для настоящего справочника в большинстве случаев использовались сведения последних публикаций.

14.2. СЖИЖЕННЫЕ ГАЗЫ

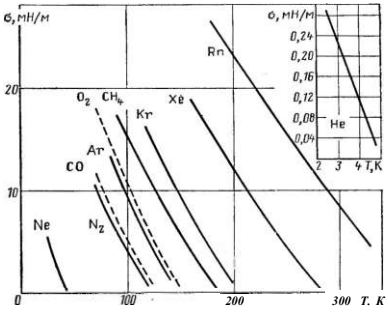


Рис. 14.1. Поверхностное натяжение сжиженных газов

Таблица 14.1. Поверхностное натяжение водорода и его изотопов, мН/м, в зависимости от температуры T, К [51

Нормальный водород		Нормальный дейт^)Ий		Параводород *пара-И*		Ортодейтерий	
20,55	1,898	20,57	3,437	20,70	1,818	20,91	3,355
20,86	1^844	20,96	3,346	21,14	1,749	21,28	3,278
21,51	1,729	21,00	3,338	22,47	1,524	21,29	3,278
22,07	1,638	21,64	3,201	22,56	1,509	21,88	3,141
22,10	1,629	22,08	3,127	23,07	1,421	21,92	3,139
22.21	1.616	22,28	3,062	23,68	1,318	22,66	2,980
22,59	1,547	22,91	2,930	24,09	1,252	23,05	2,895
23,23	1,437	22,95	2,924	24,45	1,189	23,41	2,811
24,14	1,282	23,35	2,839	24,51	1,175	24,22	2,632
24,63	1,198	23,61	2',777	25,19	1,065	25,00	2,462
25,04	1,129	24,30	2,634	25,54	1,006	25,04	2,448
25,33	1,084	24,95	2,493	25,94	0,944	25,49	2,347
25,83		25,50	2,375	26,41	0,867	26,00	2,235
26,27	0^929	25,92	2,275	26,73	0,817	26,56	2,117
26,69	0,857	26,52	2,159	27,17	0,744	27,12	1,999
26,99	0,811	27,28	1,983	27,50	0 692	27,51	1,914
27,32	0,758	27,33	1,973	27,99	oieie	28,09	1,787
27,70	0 693	28,43	1,743	28,00	0,615	28,50	1,697
28,46	0,'578	29,00	1,621	28,46	0,543	29,44	1,493
29,00	0,498	29,95	1,428	28,75	0,499	30.04	1,379
29,40	0,438	30,87	1,240	29,02	0,461	30,52	1,275
29,59	0,410	31,47	1,119	29,51	0,388	30,98	1,181
30,01	0,351	32,95	0,824	29,70	0,360	31,51	1,075
30,45	0,289	33,93	0,637	30,00	0,320	32,41	0,899
30,53	0,281	34,51	0,538	30.44	0,258	32,49	0,887
30,96	0,226	34,53	0,531	30,48	0,255	33,48	0,699
31,06	0,210	35,14	0,425	30,99	0,191	34,03	0,597
31,58	0,149	35,50	0,364	31,11	0,175	34,41	0.537
31,95	0,107	35,93	0,294	31,62	0,114	34,98	0,432
		36,32	0,235			35,53	0,342
		36,70	0.181			36,03	0.264
						36,05	0,261

14.3. ВОДА

Таблица 14.2. Поверхностное иатяжеиие воды

t	„ 1_1 ,					t	
0	75,50	130	52,90	260	23,73	362	1,53
10	74,40	140	52,79	270	21,33	363	1,37
20	72,88	150	48,68	280	18,94	364	1,22
30	71,20	160	46,51	290	16,60	365	1,07
40	69,48	170	44,38	300	14,29	366	0,93
50	67,77	180	42,19	310	12,04	367	0,79
60	66,07	190	40,00	320	9,84	368	0,66
70	64.36	200	37,77	330	7,69	369	0.54
80	62,69	210	35,51	340	5,61	370	0,42
90	60,79	220	33,21	350	3,64	371	0,31
100	58,91	230	30,88	355	2,71	372	0,20
110	56,97	240	28,52	360	1,85	373	0,10
120	54,96	250	26,13	361	1,68	374,15	0

14.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Таблица 14.3. Поверхностное натяжение предельных углеводородов от CH4 до CgHig, мН/м, в зависимости от температауры t, "С 17]

Вещество	t	• 1 1	Вещество		
Метан	-180	18		40	16,31
CH4	-170	15,8		60	14.23
	-160	13,7		80	12.24
Этан	-160	28,08		**100**	10,27
C^Hв	—150	26,34		**120**	8,34
	-140	24,62		**140**	6,51
	-130	22,91		**160**	4,74
	—120	21,23		**180**	**3,16**
	-110	19,57		200	**1,74**
	-100	17,93		210	**1,12**
	-90	16,31		ООП	**0,58**
Пропан	-130	27.8	Гептан	20	20,86
СзНе	-120	26,3	«-Оде	30	19,54
	-110	24.9		40	18,47
	-100	23,4		60	16,39
	-90	22,0		**80**	14,35
	-80	20,6		**100**	12,47
	-70	19,2		**120**	10,63
	-60	17,85		**140**	8,87
	-50	16,49		160	7,19
	—40	15,15		**180**	5,59
Бутан	-100	27,2		**200**	4,07
Н-С4Н10	-90	25,9		**220**	2,63
	-80	24,6		230	1,94
	-70	23,4		240	1,29
	—60	22,1	Октан	-40	27,50
	-50	20,88	Н-QHie	-20	25,50
	—40	19,65		0	23,70
	-30	18,43		10	22,73
Изо бутан	-100	25,2		**20**	**21,76**
ШО-С4Н10	-90	23,9		**30**	**20,79**
	-80	22,6		**40**	**19,78**
	-70	21,4		**60**	**17,82**
	-60	20,14		80	**15,94**
	-50	18,90		100	**14,13**
	—40	17,68		120	**12,39**
	—30	16,48		140	**10,70**
Пентан	-20	20,5		160	9,07
К-С5Н1.2	—10	19,3		180	7,50
	0	**18,2**		200	
	10	**17,1**		220	4',52
	20	**16,00**		230	3,80
	25	**15,48**		240	3,10
	30	**14,95**	Изооктан	0	20,58
	40	**13,80**	«so-CsHig	10	18,77
Изопентан	—20	19,40		**25**	18,32
ызо-СвН,.^	-10	18,27		**30**	17,88
	0	17,17		**40**	16 99
	10	16,08		**50**	**16,11**
	20	15,00		**60**	**15,24**
	25	14,46		**70**	**14,40**
	30	13,93		**80**	**13,50**
Гексан	0	20,56		**90**	**12,70**
	10	19,51			
	20	18,46			
	30	17,40			

Таблица 14.4. Поверхностное натяжение а нормальных предельных углеводородов (С„Н2„+2) от СдН,о до С20Н42, мн/м[7]

Вещество	*t*, «С								
	0	10	20	25	30	40	50	75	100
Нонан	24,84	23,90	22,96	22,49	22,01	21,07	20,13	17,78	15,42
Декан	25,73	24,81	23,89	23,43	22,98	22,06	21,14	18,84	16,54
Ундекан	26,57	25,68	24,78	24,34	23,89	23,00	22,10	19,87	17,63
Додекан	27,24	26,34	25,48	25,04	24,60	23,72	22,85	20,65	18,45
Тридекан	27,87	27,00	26,13	25,69	25,26	24,39	23,52	21,34	19,16
Тетрадекан		27,56	26,69	26,26	25,83	24,97	24,11	21,94	19,79
Пентадекан	—	28,02	21,17	26,74	26,32	25,46	24,61	22,48	20,35
Гексадекан	—		27,64	27,22	26,79	25,95	25,11	23,00	20,90
Гептадекан	—	—		27,64	27,22	26,38	25,54	23,45	21,35
Октадекан	—	—			27,59	26,75	25,92	23,84	21,75
Нонадекан	—	—	28,7	28,2	27,8	26,9	26,0		22,5
Эйкозан	-	-	29,0	28,6	28,1	27,2	26,4	-	23,0

Таблица 14.5. Поверхностное натяжение непредельных углеводородов рядов этилена и ацетилена и диолефинов, мН/м, в зависимостн от температуры *t*, °С 17]

Вещество	*t*		Вещество	*t*	
Этилен	-120	19,50	Октен-1	0	23,83
С,Н4	-110	17,65	**CsHie**	10	22,87
	-100	15,71		20	21,97
Гексен-1	0	20,58		25	21,44
СеНі.	10	19,55		30	20,95
	20	**18,52**		40	19,99
	25	**18,00**		50	19^03
	30	**17,49**		75	16,64
	40	**16,46**		100	14,24
	50	15,43	Ацетилен	-80	18,92
Гептен-1	0	22.40		-70	16,99
с,н,.	10	21.41		—60	15,06
	20	20.42		—50	13,13
	25	19,93	Пропадиен	-50	21,99
	30	19,43	**С3Н4**	-40	20,44
	40	18,44		—30	18,90
	50	17,45		-20	17,35
	75	14,98			

Таблица 14.6. Поверхностное натяжение циклических углеводородов, мН/м, в зависимости от температуры *t*, °С [7]

Вещество	*t*		Вещество		
Циклопентен	**0**	25,25	Циклопентан	13,5	23,30
СбНв	**10**	23,94	C5H10		
	20	22,65			
	25		Циклогексен	0	29.00
	30	21^32	QHio	10	27,80
	40	20,03		20	26,61
				25	26.01

Продолжение табл. 14.6

Циклогексен	30	25,41	Анилин	О	45
СвНю	40	24,22		10	44
	50	23.02		**20**	42,9
	75	20.03		30	41.8
Метилцикло-	13,5	24,10		40	40,7
пентан				50	39.5
СеН,,				100	33.7
Циклогексан	10	26,15		150	27.9
СеНі,	20	24,95			24.6
	25	24,35	Хлорбен	О	36.0
	30	23,75	С^Н^Cl	10	34.8
	40	22,45		**20**	33,5
	50	21,35		30	32.3
	75	18,35		40	31.1
Метилцикло-	0	26,80		**60**	28.7
гексан	10	24,74		**80**	26.4
	20	23,68		**100**	24,0
	30	23,15		150	18.5
	40	22,62		**200**	13.2
	50	21,56		250	8.3
	60	20,50		300	3,9
	70	17,58		310	3,1
	100	15,20		320	2.4
				330	1,7
Этилцикло-	0	27,87	Нитробеш	О	46.4
гексан	10	26,77	СеН^NO,	10	45,2
CsHie	20	25,67		**20**	43.9
	25	25,12			42,7
	30	24,57		40	41.5
	40	23,47		**60**	39,0
	50	22,37		100	34,4
	75	19,62		150	29,0
	100	16,87		200	23.6

Таблица 14.7. Поверхностное натяжение о ароматических углеводородов, мН/м [7]

Вещество	*t*, °С									
	0	10	20	25	30	40	50	60	80	100
Бензол C_6H_6		30,24	28,88	28,18	27,49	26,14	24,88	23,66	21,2	
Толуол $C_6H_5CH_3$	30,92	29,70	28,53	27,29	27,32	26,15	25,04	23,94	21,8	1^6
орто-Ксилол $C_6H_4(CH_3)_2$	32,28	31,16	30,03	29,48	28,93	27,84	26,76	25,70	23,6	21,5
мета-Ксилол ***$C_6H_4(CH_3)_2$***	30,92	29,78	28,63	28,08	***27,54***	26,44	25,36	24,26	22,2	20,1
пара-Ксилол $C_6H_4(CH_3)_2$			28,31	27,76	27,22	26,13	25,06	24,02	22,0	20,1
Этилбензол $C_6H_5C_2H_5$	31,38	30,18	29,04	28,48	27,93	26,79	25,74	24,74	22,7	20,7
«зо-Пропилбензол (кумол)	-	-	28,20	27,68	27,17	26,09	25,08	24,07	22,2	-

Таблица 14.8. Поверхностное натяжение галоидопроизводных углеводородов, мН/м, в зависимости от температуры *t*, °С [7]

Вещество	*t*	
Дифгордихлорметан (фреон-12) CF_2Cl_2	20	9,0
	30	7,5
Трифторхлорметан (фреон-13) CF_3Cl	—30	23,5
	—20	22,0
	—10	20,5
	0	18,5
	10	17,3
	20	16,0
	30	14,0
Хлористый метил CH_3Cl	0	12,0
	10	11,0

Продолжение табл. 14.i

Вещество	*t*	
Четыреххлористый углерод CCl_4	0	29,5
	10	28,2
	20	26,9
	40	24,5
	60	22,1
	80	19,7
	100	17,3
	150	11,7
	200	6,5
	250	2,1
	260	1.4
	270	0,7

Таблица 14.9. Поверхностное натяжение о спиртов, эфиров, кетонов и органических кислот, мН/м [7]

Вещество	0	10	20	30	50	100	150	200	220	240
Метиловый спирт CH_3OH	**24,5**	**23,5**	**22,6**	**21,8**	**20,1**	**15,7**	**10,4**	**4,5**	**2,1**	—
Этиловый спирт **C_2H_6OH**	**24,4**	**23,6**	**22,8**	**21,9**	**20,1**	**15,5**	**10,1**	**4,3**	**2,2**	**0,1**
Изопропиловый спирт **C_3H_7OH**	**25,5**	**24,6**	**23,8**	**23,0**	**21,2**	**17,2**	-	–	-	-
Бутиловый спирт C_4H_9OH	**26,2**	**25,4**	**24,6**	**23,8**	**22,1**	**17.8**	–	-	–	–
Глицерин **$C_3H_5(OH)_3$**	–	–	**59,4**	**59,0**	**58,0**	**54,2**	**48,8**	–	-	-
Эфир ДИЭТИЛОВЫЙ $C_4H_{10}O$	**19,4**	**18,2**	**17,0**	**15,8**	**13,5**	**8,0**	**3,1**	-	-	-
Этилацетат **$C^{\wedge}HgOa$**	**27,0**	**25,6**	**24,3**	**23,0**	**20,5**	**14,4**	**8,7**	**3,7**	**2,0**	**0,5**
Ацетон **C_3HeO**	**26,2**	**25,0**	**23,7**	**22,5**	**19.9**	-	–	-	–	–
Уксусная кислота CH_3COOH	–	–	**27,8**	**26,8**	**24,8**	**19,8**	**15,0**	**10,4**	**8,5**	**5,7**

Таблица 14.10. Поверхностное гетяжение органических жидкостей іна границе с водой при 20 °С, мН/м [4]

Вещеclпво	-
Амилацетат	12,0
Амиловый спирт	4,4
Анилин	5,8
Бензальдегид	15,5
Бензол	35,0
Бромбензол	
Бромоформ	40!0
Бутиловый спирт	1,8
Гексан	49,4
Гексадекан	52,6
Гексиловый спирт	6,8
Гептан	50,2
Гептиловый спирт	7,7
Декан	51.2
Дибромэтан	36,5
Дихлорметан	28.3
Дихлорэтан	31,0
Диэтиловый эфир	10.7
Додекан	51.8
Изоамиловый спирт	4,8
Изобутиловый спирт	2,0
Изовалериановая кислота	2,7
Изооктан	51,0
Иодбензол	49,0
Каприловая кислота	41,8
Капроновая кислота	8,2
жта-Ксилол	5,2
орто-Ксилол	37,9
пара-Ксилол	36,1
Мезитилен	37,8
Метилбензоат	38,7
Нитробензол	16,6
жтс-Нитротолуол	25,7
орто-Нитротолуол	27.7
Октан	27,2
Октановый спирт	50.8
Олеиновая кислота	8,5
Пентан	15,7
Сероуглерод	49,0
Стирол	48,4
Тетрадекан	34,0
Тетрахлцэтилен	52,2
Толуол	47,5
фурфурол	36,1
Хлорбензол	5,1
Хлороформ	37,4
Четыреххлористый **углерод**	31,6
Циклогексаи	45,0
Циклогексанол	50,2
Цимол	3,9
Этилбензол	34,6
Этилбромид	38,4
	31,2

14.5. ЖИДКИЕ МЕТАЛЛЫ

Таблица 14.11. Поверхностное натяжение о жидких щелочных металлов, мН/м [7]

t, °С	Li	Na	K	Rb	Cs
29					71,3
39				87,5	
64			109	–	–
100		197,8	106,6	**84,0**	67,9
200	395	187,8	100	**78,2**	63,1
300	381	177,8	93,4	72,4	58,3
400	367	167,8	86,8	66,4	53,5
500	353	157,8	80,2	60,8	48,7
600		147,8	73,6	55,0	43,9
700	325	137,8	67,0	49,2	39,1
800	311	127,8	60,4	43,4	34,3
900	297	117,8	53,8	37,6	29,5
1000		107,8	47,2	31,8	24,7
1100	269	97,8	40,6	26,0	19,9
1200	255	87,8	34,0	20,2	15,1
1300	241	77,8	27,4	14,4	10,3
1400	227	67,8	20,8	8,6	–
1500	223	57,8	14,2	–	–

Таблица 14.12. Поверхностное натяжение жидких металлов, мН/м, в зависимости от температуры *t*, *X* [8]

Металл	*t*	
Алюминий [9]	660	**915**
	800	**850**
	1000	**830**
	1100	820
	1600	725
	1830	660
Барий [10]	1273	267,3
	1373	259,7
	1473	253,0
	1573	246,3
	1673	239,6
	1773	232,9
	1873	226,2
	1973	219,4
	2073	212,7
	2173	206,0
	2273	199,3
Бериллий	1500	1100 ±35
Бор	2200	1060
Ванадий	1919	1950
Висмут	280	372,1
	300	371,0
	400	364,6
	500	357,9
	800	343
	900	336
	1000	328
Вольфрам	3395	2316
Гадолиний	1350	670
Галлий	50	706
	100	705
	200	704
	300	699
	400	694
	450	690

Продолжение табл. 16.17

Гафний	**2200**	1630
Германий	1100	604,5
	1100	594
	1550	558
Диспрозий	1407	490
Железо	1550	1850
	1600	1830
	1650	1790
	1700	1760
Золото	1100	1125
Индий	**200**	556,0
	300	547.4
	400	535,0
	500	531,2
	600	522.5
	700	512,8
	800	2504,6
Ирилнй	2454	250
Иттрий	1450	877
Кадмий	330	560
Кальций	851	1370
Кобальт	1550	1830
	1600	770
Кремний	1550	750
Лантан	**810**	745
Магний [11]	670	552
	700	542
	720	534
	740	528
Марганец	1350	1070
	1550	1030
Медь	1150	1370
	1550	1265
Молибден	2622	2225
Неодим	840	688
Никель	1550	1735
	1850	1620
Ниобий	2468	2040
Олово	300	530
	350	537
	450	535
	500	531
	600	525
	650	514
	2700	2500
Осмий	1554	1500
Палладий	1600	1460
	1760	1800
Платина	1800	1699(20]
	940	706
Празеодим	3180	2700
Рений	1966	2000
Родий	25	465
Ртуть	50	462
	100	452
	150	439
	200	429
	250	416
	300	402
	350	387
Рутений	2500	2250
Свинец	350	440
	450	428
	750	420
	800	412
	1000	220
		240
		280
		340
		385
Серебро	1000	907
	1100	894
	1200	876
Стронций [10]	797	288—292
	1373	286,1
	(473	280,3
	1573	274,4
	1673	268,6
	1773	262,7
	1873	256,8
	1973	251,0
	2073	245,1
	2173	239,3
	2273	233,4
Сурьма	650	350,2
	700	347,6
	750	346,2
	800	345,0
Таллий	302	464,5
Тантал	2996	2140—2150
Теллур	452	179
Тербий	1356	700
Титан	1672	1558
	1727	1460
Уран	ИЗО	1550
Хром	1830	1540
Цинк	420	767 (5)
Цирконий	1855	1455
	2460	1395

Продолжение табл. 16.17

105	
104	
101	
87	
80	

Таблица 14.13. **Влияние** кислорода и углерода на поверхностное натяжение железа [8]

Кислород, *t = 1570°С*		***Углерод,*** *< = 1550Х*	
0,0006	1717	0,42	1847
0,0077	1632	2,25	1822
0,02	1541	3,15	1793
0,041	1362	3,50	1805
0,07	1151	4,15	1788

14.6. РАСПЛАВЫ СОЛЕЙ

Таблица 14.14. Поверхностное натяжение расплавленных солей [1]

Вещество	*t,* °с	**а,** мН/м	Вещество	*t. "С*	а, мН/м
BiCls	271	66,0	NaNOg	308	116,6
КСЮз	368	81,0	K^Gr^O,	397	129,0
KNCs	175	101,5	Ba(N03)2	595	134,8

Таблица 14.15. Удельная свободная поверхностная энергия твердых металлов [12]

Металл	*t*, »с	Атмосфера	
Алюминий	180	Вакуум	1140+200
Бериллий	700	Гелий	1000
Висмут	239	**Вакуум] Аргон /**	521+6
Вольфрам	1500	**Вакуум**	2830+470
	1757	Вакуум	2900+290
Железо	1460	Аргон	1910+190
	1410	Водород	2320+80
•lf-Железо	1380	Аргон	2170+300
Золото	970	Вакуум	1450±80
	1025	Гелий	1400+65
	968	Воздух	1390+80
Индий	142	Вакуум \ Аргон /	633±7
Кобальт	1354	Водород	**1970+175**
Медь	1006	Гелий 1 Водород /	**1720**
Молибден	1427	Вакуум	2200+200
	1600	Аргон	2100+200
	2500	Аргон	1920+200

Продолжение табл. 14.15

Металл	*t*, "С	Атмосфера	ы/Дж/м'
Ниобий	2250	Вакуум	2100+100
Никель	1343	Аргон	1820±180
	1219	Вакуум	1860+190
Олово	215	Вакуум \ Аргон /	673±7
Платина	1310	Вакуум	2340+800
	1673	Воздух	1800+200
Свинец	309	Вакуум 1 Аргон /	560+6
Серебро	750	Азот	1140±35
	909	Гелий	1140+90
Таллий	272	Вакуум \ Аргон /	562±6
Тантал	1500	Вакуум	2680+500
Титан	1600	Вакуум	1700
Цинк	480	Гелий	830
Цинк, плоскость(0001)	-195	Азот (жидкий)	410

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамсон **А.** Физическая химия поверхностей.: Пер. с англ. М.: Мир. 1979.

2. **Щукин Е.** Д., **Перцов А. В., Амелина Е. А.** Коллоидная химия. М.: Изд-во МГУ. 1982.

3. Гиббс Дж. **В.** Термодинамика. Статистическая механика.: Пер. с англ. М.: Наука. 1982.

4. Абрамзон **А. А.** Поверхностно-активные вещества,—2-е изд. Л.: Химия. 1981.

5. **Байдаков В. Г., Хвостов К. В., Скрипов В. П.** Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение неона, водорода и его изотопов. Свердловск: Изд. Уральского научного центра АН СССР. 1981.

6. Байдаков В. Г., Хвостов К. В., Муратов Г. Н., Скрипов В. П. Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение аргона, криптона, ксенона, метана, кислорода и азота. Свердловск: Изд. Уральского научного центра АН СССР. 1981.

7. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — 2-е изд. М.: Наука. 1972.

8. **Ниженко В. И., Флока Л. И.** Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия. 1981.

9. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах. Киев: Наукова думка. 1972.

10. Шпильрайн Э. Э., Фомин В. А., Качалов В. В., Сокол Г. Ф., Сковородько С. Н. Теплофизические свойства щелочноземельных металлов **в** жидкой фазе (плотность, поверхностное натяжение, вязкость). Обзор по теплофизическим свойствам веществ. М.: Изд. Науч.-информ. центра по теплофизическим свойствам чистых веществ АН СССР. **1983.** № 2 **(40).**

11. Андронов В. Н., Чекин Б. В., Нестеренко С. В. Жидкие металлы и шлаки. М.: Металлургия. **1977.**

12. Миссол **В.** Поверхностная энергия раздела фаз **в** металлах. М.: Металлургия. 1978.

ГЛАВА 15

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

А. В. Инюшкин

15.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплопроводность — молекулярный перенос теплоты (теплоперенос) в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температур. Коэффициент теплопроводности (как теперь принято, теплопроводность) определяется уравнением Фурье

$$q = -\lambda \nabla T,$$

где **q** — плотность теплового потока, Вт/м^; % — теплопроводность, Вт/(м-К); V7" —градиент температуры, К/м. Ниже приведены соотношения между единицами теплопроводности:

1 Вт/(см-К)=М02 Вт/(м-К)

1 эрг/(см-с-°С) = MO-S Вт/(м-К)

1 кал!^/(см-сХ) =4,1868-102 Вт/(м-К)

1 кал1ь/(см-с-°С) = 4,184.10^ Вт/(м-К)

1 ккалш/(м-ч °С) = 1,16222 Вт/(м-К)

1 Btu,T/(ft-h °F)= 1,73073 Вт/(м.К)

1 Btu„.-in/(ft2.h-T) =0,144228 Вт/(м.К)

1 Btuth/(ft-h-°F)= 1,72958 Вт/(м-К)

1 Btuth-in/(ft2-h-'^F) = 0,144131 Вт/(м.К)

1 CHU/(ft-h-°F) = 3,1152 Вт/(м.К)

1 Вт/(мК)= Г•10-2 Вт/{см К)

1 Вт/(м.К) = 1• 105 эрг/(см-с-°С)

1 Вт/(м.К) = 2,38846-10-3 калЈт/(см-с-^С)

I Вт/(м К) = 2,39006-10-3 кал11,/(см.с-=С)

1 Вт/(м-К) =0,860421 ккалш/См-Ч'-'С)

1 Вт/(м-К) = 5,77789- 10-2 BtuiT/(ft-h-T)

1 Вт/(м-К) = 0,693347 BtUjT -in/1ft^-h-^F)

1 Вт/(м-К)=5,78176-10-2 Btuth/(ft-h-T)

1 Вт/(м-К) = 0„693811 Втиш-ш/({12.11-T)

I Вт/(м-К) = 0„32100 CHU/(ft-h.-F)

Примечание. Международная калория: 1 кал(у =4,1868 Дж (точное значение).
Термохимическая калория: I калЈ(^ = 4,1840 Дж.
Британская тепловая единица: 1 Btui^ = 1.05505-10= Дж.
1 Btujj, = 1,05435-10» Дж.
1 СНи = 1899.1 ДЖ.,

Уравнение Фурье справедливо для небольших значений градиента температуры (когда отклонение системы от равновесного состояния мало) и в случае, когда средняя длина свободного пробега частиц (квазичастиц), участвующих в теплопереносе, мала по сравнению с геометрическими размерами системы Для кристаллических твердых тел коэффициент теплопроводностн представляет собой симметричный тензор второго ранга.

Процесс распространения теплоты описывается уравнением теплопроводности, которое в простейшем случае имеет вид

$$dT/dt =$$

где ***T(x. y. Z, i)*** — температура, К. в точке с координатами *X, y, z; i* — время, с; с — удельная теплоемкость, Дж/(кг-К); Y —плотность,
+ ***дЧ1дz***\ К/м2,

Экспериментальные методы определения теплопроводности основаны на решении уравнения теплопроводности [1, 2].

Теплопроводность зависит от агрегатного состояния вещества, его состава, чистоты, температуры, давления и других характеристик. Так, для большинства веществ теплопроводность жидкой фазы примерно в 10 раз больше, чем теплопроводность газообразной фазы, а для твердого тела она значительно выше, чем для жидкости около точки плавления (за исключением жидких висмута, олова, теллура).

На практике часто случается, что теплопроводность внутри тела и вблизи его границ различна. Это различие обусловлено как изменением условий протекания процессов теплопереноса, так и изменением структуры вещества (в результате термообработки, наклепа и т. д.). В таблицах этой главы приведены коэффициенты теплопроводности для части тела, удаленной на достаточное расстояние от границ.

Существенное влияние на теплопроводность могут оказывать внешние факторы, например облучение, изменение давления, магнитного поля.

В полупрозрачных средах теплопроводность сопровождается радиационным теплопереносом. Наблюдаемая эффективная теплопроводность таких сред есть сумма собственно теплопроводности и радиационного теплопереноса. Вклад радиационной составляющей комбинированного теплопереноса увеличивается с повышением температуры и становится существенным при температурах, составляющих несколько сотен градусов Цельсия.

Погрешность приведенных в настоящей главе данных о теплопроводности меняется в зависимости от вещества, области температур (как правило, увеличивается при низких и высоких температурах) и давлений (увеличивается с повышением давления). В основном погрешность значений теплопроводности составляет 10—20%. Для ряда веществ, изученных наилучшим образом, погрешность данных лежит в пределах 1—2%. Число значащих цифр в приведенных значениях X в целом согласуется с их погрешностью. Однако в тех случаях, когда целесообразно показать характер изл1енения К (например, в зависимости от состава вещества или температуры), число значащих цифр увеличено до трех.

Основные вопросы теории теплопроводности, а также экспериментальные методы исследований теплопроводности рассмотрены в [3]

15.2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРОСТЕЙШИХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

В табл. 15.1 собраны в основном ***обобщенные*** данные о теплопроводности веществ в диапазоне температур от 4 до 1000 К. В редких случаях приведены данные отдельных экспериментов.

Значения X при средних и высоких температурах для твердых веществ близки к значениям коэффициента теплопроводности хорошо отожженных высокочистых (степень чистоты 99,99%) образцов.

При низких температурах теплопроводность твердых элементов сильно зависит от степени совершенства кристалла, наличия примесей и других дефектов. Значения Я при температурах вблизи и ниже температуры, соответствующей максимуму теплопроводности, относятся к наиболее чистым и совершенным образцам. Для металлов приведены значения остаточного уде-чьного электрического сопротивления ро [либо отношения р(300 К)7ро], которые характеризуют качество образцов.

Теплопроводности простейших газообразных веществ приведены при давлении 10^ Па.

в цесом погрешность значений К при средних температурах меняется от 2 до 10% в зависимости от вещества и возрастает до 20% при низких и высоких температурах.

Подробную информацию о теплопроводности элементов и оценки погрешностей можно найти в [4—7].

15.3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ

Теплопроводность разреженного газа слабо зависит от температуры (как $T^{1/2}$) и давления (табл. 15.2 и 15.3). Газ можно считать существенно разреженным до давления порядка Ю" Па при комнатной температуре и до давления примерно 4-10's Па при Г^ЮОО К [8]. Для оценки теплопроводности разреженного газа применима формула Эйкспа

где 1] — динамическая вязкость. Па • с; Cv — молярная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(моль-К); М — молярная масса, кг/моль; —универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль-К).

При высоких давлениях ?i зависит от давления. В табл. 15.4 приведены зависимости теплопроводности некоторых газов от давления. При низких давлениях, когда длина свободного пробега молекул сравнима с размерами сосуда (для большинства систем при $p<10$ Па), теплопроводность пропорциональна давлению газа и стремЁтся к нулю с уменьшением давления. В этих условиях теплопроводность определяется не только свойствами газа, но и энергообмеыом на границах, который характеризуют коэффициентом аккомодации.

Результаты теоретического и экспериментального исследонанпн различных аспектов теплопроводности газов приведены в [9—11]. Теплоперенос в зазоре, заполненном сильно разреженным газом, рассматривается в [12]. Экспериментальные данные о теплопроводности большинства изученных веществ в газообразном состоянии систематизированы в справочниках [6, 13, 14].

15.4. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Теплопроводность жидкости при температуре 0°С и атмосферном давлении с погрешностью ±107о может быть рассчитана по полуэмпирической формуле [15]

где Л' — число атомов в молекуле жидкости; Гкип — температура кипения. К; у — плотность жидкости, г/см®; Cv — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(см3-К).

Теплопроводность жидкости увеличивается при понижении температуры (вода и глицерин представляют иск.пючение). В интервале температур $-50<^{\circ}<50$°С зависимость ?.(/) может быть приближенно представлена выражением [15]

$$X\ (O = л\ (O\ °C)\ \backslash 1 \quad -\ 0\ ,\ 0\ (\ т\ 1\ ^{\wedge}\ /\ 2\ 3\ ,\ 5\ -\ \ 1)]\ ,$$

где < — температура, *"С.* Теплопроводности жидкостей приведены в табл. 15.5 и 15.6.

У всех жидкостей теплопроводность увеличивается с ростом давления. Это увеличение практически несущественно до давлений 5-10® Па. При высоких давлениях, достигающих 1,2-10® Па, теплопроводность при температуре О °С можно рассчитать по формуле [15]

$$\text{А}(p) = I\ (\text{О Па})\ [\ 1\ +\ \ (p/1{,}44\ \ -1$$

где Yo — плотность при $p=0$ Па, г/см®; р — избыточное давление. Па.

Теплопроводность жидкостей рассмотрена в [9, 11, 15, 16]. Экспериментальные данные собраны в [6, 13—15].

15.5. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ГЕЛ

Теплопроводность твердых тел в подавляющем большинстве случаев обусловлена двумя механизмами: движением электронов проводимости (электронная теплопроводность) и тепловыми колебаниями атомов решетки (фононная теплопроводность). Пер.вый механизм доминирует в металлах, второй определяет теплопроводность неметаллов. В некоторых полупроводниках, полуметаллах и сильно разупорядоченных сплавах оба механизма дают сравнимые вклады в теплопроводность.

При низких температурах теплопроводность твердого тела существенно зависит от количества и типа примесей, дефектов решетки. Это обусловлено тем, что при низких температурах электроны в металлах сильно рассеиваются на дефектах атомного масштаба, а фононы в диэлектриках — на дефектах с размерами несколько сотен межатомных расстояний. В совершеных диэлектрических кристаллах при температурах около 1 К длина свободного пробега фононов сравнима с размерами образца (обычно равна примерно 5 мм). В этом случае теплопроводность зависит от характера процессов рассеяния фононов па границах образца и его размеров.

При высоких температурах длины свободного пробега носителей ограничены в металлах в основном электрон-фононным рассеянием, в неметаллах — фонон-фононным. Поэтому при высоких температурах теплопроводность твердых тел слабо зависит от примесей и дефектов.

В аморфных диэлектриках в широком диапазоне температур длина свободного пробега фононов ограничена рассеянием на дефектах структуры. Теплопроводность аморфных тел значительно меньше, чем теплопроводность кристаллов. Поликристаллические тела обладают промежуточной теплопроводностью между теплопроводностями монокристаллов и аморфных тел.

Теплопроводность металлов и сплавов можно оценить, используя закон Видемана—Франца;

$$= \ ^{\wedge}ooГ,$$

где LO=2,445-10-8 ВТ•ОМ/К^ — число Лоренца; а — электропроводность, (Ом-м)-1; Г — температура. К- Для большинства металлов и сплавов закон Видемана—Франца справедлив при высоких и очень низких температурах. Для чистых металлов в области промежуточных температур этот закон дает завышенные значения Я. Для сплавов он дает заниженные значения теплопроводности (до 10 раз при температурах около 20 К для сильно разупорядоченных многокомпонентных сплавов).

Б настоящей главе приведены теплопроводности некоторых технических сталей и сплавов (табл. 15.7—15.16), полупроводников (табл. 15.17), совершенных диэлектрических монокристаллов (табл. 15.18), стекол (табл. 15.19), огнеупорных материалов и высокотемпературных композиций ядерного топлива (табл. 15.20—15.24), строительных и теплоизоляционных материалов, древесины, горных пород и прочих веществ (табл. 15.25—15.29).

Теория теплопереноса в твердых телах и экспериментальные данные о теплопроводности рассмотрены в [17—20]. Введение в теорию теплопроводности твердых тел и жидкостей под давлением, методы измерений, экспериментальные данные обсуждаются в [21]. Большое количество данных о теплопроводности твердых тел приведено в справочниках [7, 22—25].

Таблица **15.1. Теплопроводности простейших химических веществ, Вт/(м·К) [4]**

Элемент	*m*, к											
	4	10	20	40	80	150	200	300	400	600	800	1000
Азот газообразный [6]					0,0078	0,0139	0,0183	**0,0257**	0,0324	0,0446	0,0554	0,065
Алюминий, $p_{„}$=0,594.10-9 Ом-см	15 700	23 500	И 700	2400	430	248	237	**237**	240	230	220	93ж
Аргон газообразный [6]					0,006*	0,0096		**0,0177**	0,0222	0,0307	0,0374	0,0436
Барий, $p_{„}$ = 0,25-Ю-» Ом'СМ	39					21	М126	**18**				
Бериллий поликристаллический, Ро = 13,5.10-9 Ом-см	720	1800	^00	4600	1600	450	300	**200**	160	126	106	***m***
Бор ноликристаллический	38	180	350	430	260	94		**27**	17	10,6	9,6	9,9
Бром жидкий							55	**0,12**				
Ванадий, $p_{„}$ = 1,72-10"» Ом-см		14	26	39	39	32	31	**30,7**	31,3	33,3	36	36
Висмут:												
поликристаллический			90	41	20,3	11,8	9,7	7,9	7,0	13	15	17
II тригональной оси			70	31	14,8	8,3	6,7	5,3	4,7			
± тригональной оси	1700	290	100	47	23,0	13,6	11,2	9,2	8,2			
Водород газообразный [6]	-	-	0,0158	0,0308	0,055	0,101	0,131	0,183	0,226	0,305	0,38	0,45
Дейтерий газообразный [6]	-	-	0,0120	0,0262	0,049	0,081	0,101	0,133	0,163	0,216	0,27	0,32
Вольфрам, ро= 1,7-10-е Ом-см	5600	9700	1 4100	690	230	192	185	174	159	137	125	118
Гадолиний:												
поликристаллический, Ро = 3,71-10-0 Ом-см	4,9	12	17	17	15	13	12	10,5	-			16*2
||осие, ро = 2,62-10-« Ом-см	5,9	14	17,5	16	14	12	11,2	10,8		14 9*3	16,4*3	17,8*3
J- оси с, ро = 4,43х Х10-в Ом-см	4,4	И	17	18	16	13,3	11,9	10,4		12,3*^	14,3**	16,3**
Галлий*^:												
II оси а, ро=0,1-10-**I**'Om-dm	9900	1200	270	80	50	44	42		34,5ж	46,2ж		
i| оси 6, $p_{„}$ = 0,034 Х Х10-9 Ом-см	27 000	3300	1700	200	98	92	90	88			●	
II оси с, р(|=о,425х Х10-9 Ом-см	3100	350	84	33	20	16,7	16,3	15,9			●	—
Гафний поликристаллический, Ро = 4,23-10-е Ом-см	3,5	9,5	18	24	26	25	24	23,0	22,3	21,3	20,8	20,7
Гелий газообразный [6]	0,0083	0,0171	0,0260	0,040	0,064	0,095	0,116	0,152	0,183	0,244	0,301	0,355
Германий	880	1800	1500	800	330	132	97	60	43	27	20	17
Гольмий:												
поликристаллический, Ро = = 2,67-10-е Ом-см	5,8	12	14	16	15	13.5	15	16	13,5«	14*6	15*6	16,5*8
Ⅱ оси с $p_{„}$ = 3,21х Х 10-" Ом-см		13	16	18	17	18	20	22				
оси с, Ро=2,82- 10-Юм-см		12	14	15	14	12	13	14				
Диспрозий:												
поликристаллический, рд = = 4,93- **10-Е** Ом-см	4,4	10	14	14	12	9,0	9,6	11	11	12	14	15

Элемент			
	4	10	20
II ОСИ С, ро = 5,77х х10-« Ом-см		0,4	12
J. оси с, Р„ = 4,59 Х Х 10-® Ом-см		11	16
Европий	2,5*'	—	—
Железо, р„ = 14,3-10-» Ом-см	680	i-tro	1540
Золото, Ро = 5,50-10-8 Ом-см	2100	3200	1580
Индий поликристаллический, Ро = 0,587-10-9 Ом-см	5000	590	190
Иод	—	—	—
Иридий, р„ = 19,1-10-8 Ом-см	520	1300	1900
Иттербий поликристаллический [29]			
То же, р(293 К)/Ро = 4,9 [30]	—	12	13
Иттрий:			
поликристаллический, = = 5,54-10"» Ом-см	2,7	7,0	13
II оси с, Ро = 2,3 Х хЮ-е Ом-см	5,3	13	23
1 оси с, ро=8,7-10-«0м-см	1,9	5,0	9,4
Кадмий:			
поликристаллический, ро = = 0,112-10-» Ом-см	30 000	1200	230
II оси с, Ро = 0,134х XIO-9 Ом-см	26 000	1150	210
1 оси с, Ро = 0,103 Х XIO-8 Ом-см	31000	1250	240
Калий, р„ = 2,20 • 10-S Ом-см	1900	460	170
Кальций, р (273К)/ро = 70 [31]			
Кислород газообразный [6]	—	—	—
Кобальг поликристаллический, Ро== 90,75-10-» Ом-см	ПО	260	440
Кремний	300	2300	5000
Криптон газообразный [6]		—	
Ксенон газообразный [6]	–	—	—
Лантан поликристаллический, Ро = 1,29'10-» Ом-см	8,8	18	17
Литий, р„ = 37,2-10-8 Ом-см	260	610	720
Лютеций:			
поликристаллический, р„= = 1,45-10-" Ом-см	7,9	20	25
11 осис, Р(|=0,76-10-®0м-см	16	36	41

ттшшшшшт

Продолжение табл. 15.1

40	80	150	200	300	400	600	800	1000
12,4	11,7	8,7 <	10	12	—	—	—	—
15	12	9,7	9,3	10	-	-	-	-
620 520 109	175 332 99	17 104 325 94	15 94 323 90	14 80 317 82	70 311 75	10*8 55 298 43ж	11,5*8 43 284 48ж	270
rëo		160 20	153 21	0,45г 147 47	144	0,007г 138	0,009г 132	126
И	10							
15,2	15,7	16,4	16,6	17,2	18	21	23	25
24	24	25	-	-	-	-	-	-
12,]	12,7	13,3	-	-	-	-	-	-
130	106	101	99	97	95	88*9	42ж	—
113	91	86	85	83	81	75*9	-	-
140	113	108	106	104	101	94*8	-	-
115 280 i o	108 190 0,0074 190	105 190 0,0138 140	104 190 0,0183 122	102 180 0,0267 100	52ж 0,034 85	44ж ^047 67	37ж ^058 58	31ж 0,070 52
3500	1340 0,0034*"	410 0,0050	260 0,0066 0,0038	150 0,0096 0,0057	99 0,0124 0,0074	62 0,0174 0,0106	42 0,0218 0,0136	31 0,0256 0,0163
-	-	-						
10	9,4	10,9	11,8	13,5	14,9	18	21	23
340	120	95	90	85	80	48ж	54ж	бОж
22	20	18	18	16	-	13*11	14,5*11	16*11
32	29	26	25	23	—	-	-	-

Элемент	4
⊥ оси c, $\rho_0 = 2{,}65 \times 10^{-6}$ Ом·см	5,3
Магний поликристаллический, $\rho_0 = 2{,}61 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	3800
Марганец, $\rho_0 = 11{,}3 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	0,96
Медь, $\rho_0 = 0{,}589 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	16 200
Молибден, $\rho_0 = 0{,}167 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	61
Мышьяк	—
Натрий, $\rho_0 = 1{,}47 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	4900
Неодим поликристаллический	—
То же [32]	1,1
Неон газообразный [6]	—
Никель, $\rho_0 = 11{,}2 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	860
Ниобий, $\rho_0 = 67{,}9 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	140
Олово:	
поликристаллическое, $\rho_0 = 0{,}132 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	18 000
∥ оси c, $\rho_0 = 0{,}170 \times 10^{-6}$ Ом·см	14 000
⊥ оси c, $\rho_0 = 0{,}118 \times 10^{-6}$ Ом·см	20 000
Осмий:	
поликристаллический, $\rho_0 = 23{,}4 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	420
∥ оси c, $\rho_0 = 16{,}7 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	590
⊥ оси c, $\rho_0 = 27{,}8 \times 10^{-9}$ Ом·см	350
Палладий, $\rho_0 = 12{,}3 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	760
Платина, $\rho_0 = 10{,}6 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	880
Плутоний поликристаллический [33]	—
Празеодим поликристаллический	—
Прометий	—
Радий [23]	—
Рений поликристаллический, $\rho_0 = 3{,}66 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	2500
Родий, $\rho_0 = 8{,}40 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	1200

Продолжение табл. 16. 12

Элемент	4	10	20	40	eo	150	200	300	400	600	S00	1000
Ртуть:												
поликристаллическая	230	46	40	36	33	30	29	8,3ж	9,8ж	12,Oж	12,8ж	И,7ж
II тригональной оси	280	58	50	45	40	36	34					
1 тригональной оси	200	40	35	32	29	27	26					
Рубидий, ро = 38,4-10-9 Ом-см	190	110	69	64	61	59	59	58	32ж	29ж	25ж	22ж
Рутений поликристаллический, Ро = 15,8-10-' Ом-см	620	1500	2300	950	190	128	118	117	114	108	102	98
Самарий поликристаллический, Pd = 6,73-10-9 Ом-см		6,1	6,9	7,5	7,1	9,2	11	13	13	14	16*14	-
Свинец, Ро = 0,682-10-® Ом-см	2200	180	59	45	41	38	37	35	34	31	19ж	22ж
Селен:												
II оси с	140	140	59	26	13	7,6	6,1	4,5	5.4	^	E	
^ оси с	27	36	17	7,4	3,6	2,2	1,7	1,3	1.5			
аморфный	0,032	0,042	0,056	0,079	0,13	0,20	0,26	0,53				
Сера:												
поликристаллическая	10,6	8,2	2,4	1,1	0,65	0,43	0,36	0,27	0,13ж	0,17ж	-	-
аморфная					0,16*1	0,175	0,185	0,206				
Серебро, $\rho_{\perp}$= 0,621-10-9Ом-см	14 700	16 800	5100	1050	470	432	430	429	425	412	396	379
Скандий поликристаллический, $\rho_{\perp}$= 10,6-10-е Ом-см	2,8	6,8	12	14	14	15	15,5*"	16*16	16,2*15	16,7*15	17,2*15	17,7*1?
Стронций	-	-	-	-	-	45	41	35	32	28	28	26
Сурьма поликристаллическая	190	480	240	110	55	36	30	24	21	18	17	27ж
Таллий поликристаллический, Ро = 0,240-10-® Ом-см	1800	190	81	65	58	52	49	46	44	-	-	-
Тантал, Ро=0,214-Ю"" Ом-см	46	107	140	87	60	58	58	58	58	59	59	60
Теллур:												
II оси с	670	310	95	32	12,2	5,9	4,6	3,4	2,8	2.3	4,2ж	6,5ж
J. оси с	250	130	41	15	6,2	3,3	2,6	2,0	1,7	1.4		
Тербий:												
поликристаллический, $\rho_{\perp}$ = 2,19-10-» Ом-см	8,4	19	23	19	15	12	10	11	-	14,7*"	15,3*w	16,7*16
II оси с, Ро=1,87-10-е Ом-см	18«з	26	29	23	19	15	13	15		15«7	16,4*"	18*1'
1оСИ с, Ро= 2,37-10-е Ом-см	11*13	16	20	17	14	11	9,0	9,6		13«7	14,9*1'	17*1'
Технеций поликристалличе-ский [27]								55	53	49	51	55
Титан поликристаллический. ро = 1,90-10-е Ом-см	5,8	14	28	39	33	27	25	22	20	19	20	21

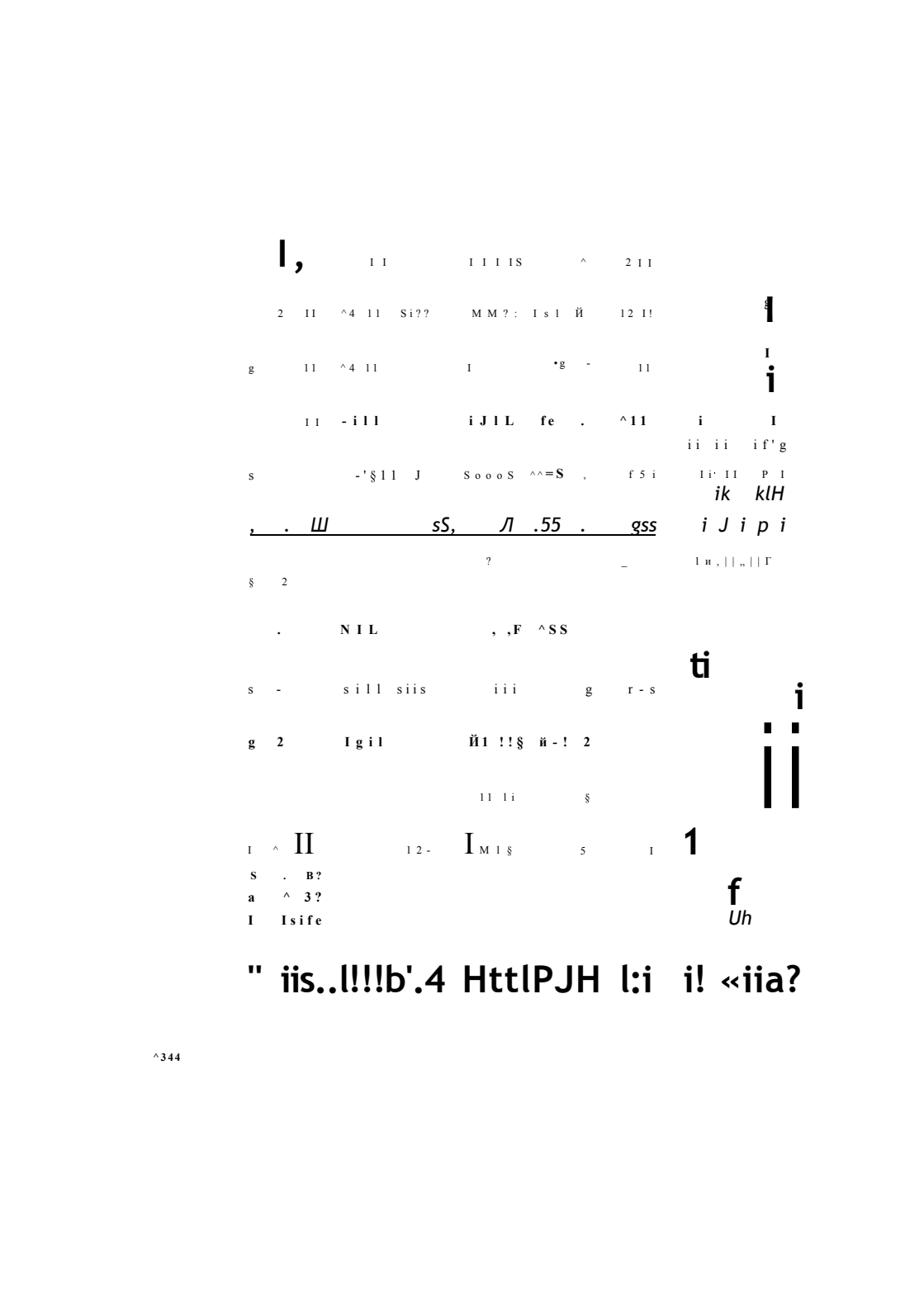


Таблица 15.2. Теплопроводности неорганических газов при атмосферном давлении [6, 14]

Х, 10-» Вт/(м-К)	л, 10-» Бт/(м.К)
Азота закись NgO	
200	**9,75**
250	**13,4**
300	**17,3**
400	**25,3**
600	**41,1**
700	**48,1**
Азота оксид NO	
120	**10,2**
200	**17,6**
300	**25,9**
400	**33,6**
600	**47,8**
800	**62,7**
900	**71,2**
Аммиак NH3	
200	**13,3**
300	**24,4**
400	**37,4**
600	**66,8**
800	**98,5**
Водяной пар H^O	
373	**25,1**
473	**33,3**
573	**43,4**
673	**54,8**
773	**67,0**
873	**79,9**
973	**93,4**
1073	**107**
Водяной пар DjO	
373	**24,8**
473	**33,9**
573	**44.2**
673	**56,1**
773	**69,7**
823	**76,9**
Воздух	
80	7,5
100	9.3
150	13,8
200	18,0
300	26,2
400	33,8
600	46,9
800	57.3
1000	66,7
1200	76,3
Сера шестифтористая SFg	
200	**4,53**
300	**13,2**
400	**20,3**
600	**32,7**
800	**43,2**
1000	**54,0**
Сероводород HoS	
180	**3,36**
200	**6,08**
250	**11,2**
300	**14,8**
400	**20,3**
600	**34,4**
Серы диоксид SO^	
270	
300	9,70
	14,8
	25,3
	35,7
1000	45.7
1200	54.8
1370	61,6
Углерода диоксид CO^	
200	9,38
	16,6
	24,3
	40,7
	55.1
1000	**68.2**
1200	80,3
1400	
Углерода оксид CO	
80	6,91
100	8,71
150	13,2
200	17,4
300	24,9
400	31,9
600	45,0
800	57,0
1000	68,3
1200	79,2
1400	90,0
1500	95,4

Таблица 15. 3. Теплопроводности органических газов при атмосферном давлении [6]

л, 10-» Вт/(м.К)	Х. 10-» Вт/(м-Ю
Ацетон CH_3COCH_3	
300	**11,2**
350	**15,7**
400	**20,4**
450	**25,3**
480	**28,3**
Бензол CeHб	
320	**11,9**
350	**14,7**
400	**19,7**
450	**24,8**
500	**30,2**
600	**41,0**
660	**47,8**
н-Бутан C4H10	
	13,8
	16,1
	22,1
	28,4
	35.2
	42,4
	53.3
Н'Гексан CбH14	
360	19,1
400	23,6
450	29,5
500	36,0
600	50,0
630	54,5
н-Гептан CyHig	
	19.6
400	21.7
450	27.4
500	33.5
600	46.6
630	51,0
н-Ксилол CgHio	
450	24,0
500	29,7
600	41,2
700	52,7
Метан CH4	
120	**12,8**
150	**16,2**
200	**21,8**
300	**34,2**
400	**49,3**
500	**68,0**
600	**88,8**
700	**109**
750	**118**
н-Октан CeH^a	
420	**22,2**
450	25,4
500	31,1
	43,7
н-Пентан C5H1	
320	16,6
350	**20,0**
400	26,0
450	32,5
470	35,2
Пропан CзHa	
	13,5
	18,2
400	31,1
500	45,9
600	62,6
700	81,3
800	101
Пропилен CзHe	
230	10,9
250	12,5
300	17,6
350	23,5
400	30,0
450	36,7
500	43,5
600	57,9
Спирт н-амиловый CбHцOH	
	23.6
450	26.7
500	32,6
600	47,2
Спирт изопропиловый CaHjOH	
400	25,4
450	31,0
500	37.3
560	45.4
Спирт метиловый CH_3OH	
400	26,1
450	31,6
500	37,5
570	46,8
Спирт этиловый C2H5OH	
400	25,8
450	31,6
500	37,8
570	47,2

Продолжение ***табл. 15.3***

T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Толуол CjHg	
	16,5
400	18,7
450	24.5
500	30,2
600	41,7
700	53.6
Углерод четыреххфтористый CF4	
200	***8,91***
250	12,6
300	16,5
350	20,4
400	24,2
450	27,8
500	31,2
600	37,5
700	43,5
Углерод четыреххлористый CCl_4	
	6,71
350	8,34
400	9,95
450	11,6
500	13,2
600	
Фреон-П $CFCl_3$	
300	8,7
350	10,7
400	12,7
450	14,7
500	16,4
Фреон-П CF2Cl2	
250	
300	10,2
350	12.4
400	15,0
450	17.5
Фреон-13 CF_3Cl	
250	9,4
300	12.5
350	15.6
400	18,6
450	21.7
Фреон- 21 CHFClj	
300	9,0
350	11,5
400	14,0
450	16,4

T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Фреон-22 CHF_2Cl	
250	8,0
300	10,6
350	14,2
400	16,6
Циклогексан CgHis	
380	19,2
400	21,7
450	28,0
500	35,0
600	51,0
630	56,4
Этан CgHe	
200	11,4
250	15,6
300	21,4
350	28,5
400	36Jl
450	44,3
500	53,0
600	71,5
700	90,7
Этил хлористый C2H5Cl	
260	8,85
300	11,6
350	15,3
400	19,4
450	23,8
500	28,6
540	32,7
Этилен C2H4	
180	9.7
200	11,0
250	15,2
300	20,6
350	27,0
400	34,2
450	42,4
500	51,0
600	66,2
Этилформиат $HCOOC_2H_5$	
350	16,9
400	22.7
450	29,0
500	36.8
600	58,0
Эфир диэтиловый	
350	19,9
400	25,9
450	31,5
500	36,7

Таблица 15.4. Теплопроводности газов при различных температурах и давлениях [6, 14]

Газ	*т.* к	X, 10-» Вт/(м-К) при *р.* Ю- Па				
			100	300	SCO	1000
Азот N2	100	9,58	108	129	145	
	150	13,9		83,6	101	
	200	18,3	29,4	58,9	78,1	—
	300	25,7	30,8	44,6	57,9	84,6
	400	32,4	35,6	44,5	53,8	74,1
	600	44,6	46,3	51,8	57,1	70,3
	800	55,4	56,7	60,6	64,5	74,4
	1000	65,4	66,6	70,0	72,9	80,2
	1400	84,4	85,2	86,8	88,7	94,7
Аммиак NHg	200	13,2	658	662	—	—
	300	24,4	479	501	—	
	400	37,4	123	321	—	
	600	66,8	76,9	108	—	—
Аргон Ar	100	6,6	118	131	—	—
	150	9,6	61,5	84,3	98,6	
	200	12,6-	23,5	55,0	70,9	
	300	17,7	22,5	34,8	47,0	69,6
	400	22,2	25,4	33,0	41,5	59,2
	600	30,7	32,9	36,7	41,4	52,8
	800	37,4	39,0	42,0	45,3	53,7
	1000	43.6	44,9	47,2	49,7	56.2
Водород нормальный к-Нг	20	100*1	124			-
	50	37,2	110	177	231	
	100	67.7	93,1	142	179	—
	150	101	117	148	176	
	200	131	143	165	186	
	300	183	191	205	219	
	400	225	231	242	252	
	500	266	271	280	288	-
Водяной пар HjO	273, 15	561*1	566*1	577	588	612
	373, 15	25,1	684*1	695	706	732
	473, 15	33,3	671*1	688	704	741
	573, 15	43,4	551*1	589	619	675
	673, 15	54,8	67,9	331	451	548
	773, 15	67,0	75,6	114	203	395
	873, 15	79,9	87,1	112	152	272
	973, 15	93,4	100	121	151	236
	1073, 15	107	113	131	156	225
Воздух	100	9,3	124	143	158	—
	150	13,8	53,6	92,3	113	—
	200	18,0	29,4	61,9	82,8	—
	300	26,2	31,4	45,6	59,0	87,9
	400	33,8	37,3	46,4	55,4	76,9
	600	46,9	49,0	54,3	59,8	72,9
	800	57,3	58,8	62,4	66,4	75,9
Гелий He	20	26,0	60,0	99,0	136	—
	50	46,6	64,1	95,6	121	
	100	73,3	86,3	110	130	
	150	95,1	104	118	137	
	200	116	123	135	147	
	300	152	157	165	173	194
	400	183	186	193	199	216
	600	244	246	251	255	266
	800	301	303	306	309	318
	1000	355	356	359	362	369
	1500	475	476	478	480	485

Продолжение табл. 16.17

Газ	Г, к	Х, 10-= Ет/См-К) при *р*, 10' Па				
		•	100	300	500	1000
Кислород О2	100	9,25	142	153	161	
	150	13,8	81,2	105	117	
	200	18,3	33,4	71,3	89,5	
	300	26,7	32,7	50,1	63,1	
	400	34,1	39,1	49,2	59,5	
	600	46,8	48,7	55,6	62,0	
	800	58,3	60,7	65,7	69,5	
	1000	69,5	70,3	73,5	77,7	
	1400	91,3	91.8	93,8	95,9	–
Метан СН4	100	212*1	222	237	249	—
	150	61,2	150	173	194	
	200	21,8	—	126	144	
	300	34,2	44,7	74,0	96,0	136
	400	49,3	55,8	72,3	88,0	118
	600	88,8	92,6	102	ПО	131
	750	118	121	127	135	151
Углерода	300	16,6	87,4	118	137	171
диоксид	400	24,3	30,9	60,9	83,3	119,5
со^	600	40,7	43,7	53,2	64,1	87,3
	800	55,1	57,3	63,2	69 8	85,6
	1000	68,2	69,8	74,1	78,'8	90,6
Фреон-14 ГР.	200	8,98	62,2	74,8	87,6	—
	300	16,5	29,0	51,0	62,0	
	400	24,2	30,9	48,5	59,9	–
Этан СаНg	200	11,4	171	186	198	—
	300	21,4	—	111	130	
	400	36,1	48,3	81,8	102	135
	600	71,5	75,3	87,7	99,7	124
Этилен С2Н4	150	211*1	222	233	244	
	200	11,0	166	188	205	
	300	20,6	69,1	107	129	
	400	34,2	45,0	77,1	97,3	–

" Жидкость при давлении ниже критического.

Таблица 15.5. Теплопроводности жидкостей на линии насыщения [6, 14J

т. к	1, 10-2 Вт/(м К)	*т.* к	Х, 10-2 Вт/(м-К)
Азот N2		***Аргон*** Аг	
65	160	85	126
70	151	90	120
80	132	100	108
90	114	ПО	96,3
100	96,6	120	84,2
110	79,5	130	71,8
120	62,8	140	59,2
125	52,0	150	40,4
Аммиак NH3		***Ацетм*** < CH_3COCH_3	
200	657	200	197
250	562	250	178
300	467	300	159,5
350	360	350	140,5
400	230	400	122
		450	103
		500	84

Продолжение табл. 16.17

Т. к	Х, 10-г Ет/(м-К)
Бензол CeHb	
290	148
300	143
350	128,5
400	113;5
450	99
Вода HoO	
273,15	561
323,15	644
373,15	679
423,15	682
473,15	663
523,15	622
573,15	548
623,15	445
643,15	424
Вода тяжелая D^O	
277,15	568
323,15	620
373,15	640
423,15	631
473,15	596
523,15	541
573,15	478
623,15	378
-Водород Ha	
	95,0
	100
	103
	104
	102
	97.6
	92,8
	83.7
Гелий I He I	
2.5	
3,0	20.3
3,5	23,2
4,0	28,1
4,5	34 8
5.0	43.4
Глицерин CsHgOg	
	282
300	
400	300
500	315
Дифенил CisHm	
350	137
400	130
450	123
500	116
550	109
	105

Т. к	к 10-S Вт/(м.К)
Кислород 0.2	
90	148
100	135
ПО	122
120	109
130	95,1
140	82,0
150	65,3
Спирт метиловый CH_3OH	
180	243
200	236
250	218
300	202
350	188
400	176
450	167
4S0	162
Спирт н-пропиловый C_3H_7OH	
150	182,5
200	176
250	166
300	154
350	144
400	136
450	128
480	124
Спирт этиловый C.3H5OH	
160	207
180	202
200	196
250	180
300	166
350	153
400	143
420	140
•-Терфенил C^Hi4	
350	136,5
400	133
450	130
	128
Толуол C,H8*	
180	159,5
200	157
250	145
300	132,5
350	120
400	108
450	97
500	85,5
550	76,5
570	73,5

Продолжение табл. 16. 15

	X, 10-' Вт/ (м-К)	*т.* к
Углерод четыреххлористый CCl4*1		
250	113,7	
300	102,7	
350	91,5	
400	80,4	
450		
470	65Л	
Углерода диоксид COa		
220	181	
250	140	
270	113	
290	90.0	
295	**86,0**	
300	85,0	
Фреон-11 CPC!з		
173	120	
223	108	
273	96,1	
323	83,9	
373	72,0	
413	63,0	
Фреон-12 CFjCIa		
123		
173	112	
223	93,1	
273	76,0	
323	**62,0**	
353	53,7	
Фреон-21 CHFCb		
203	134	
223	127	
273		
323	92,0	
373	75,5	
Фреон-22 CHFaCl		
123	163	
173	143	
223	119	
273	96.5	
	75,2	
	62.6	
Этиленгликоль (CH20H)2		
280	250	
300	254	
350	260,5	
400	260	
450	254,5	

Рекомендованы в [6] в качестве образцовых веществ.

Таблица 15.6. Теплопроводности масел и некоторых продуктов перегонки нефти [13, 15]

Вещество	*t,* "С	X. Вт/(м-К)"
Бензин Б-70 (жидкий)	-50---50. ••200	•0,080
Вазелин	25	0,18
Газолин	30	0,14
Керосин Т-1 (жидкий)		•0,074
Масло:		
касторовое	20	0,18
оливковое	20	0,17
парафиновое	30	0,12
трансформаторное (ГОСТ 982-80)		•0,10
АМГ-10	20-••100	И
ВМ-4	-3О^^^ЮО	
МС-20	О--150	12
ТМ-1	-50-••100	0,125-^^0,11
ХФ-22	-6О^^^ЮО	0,17-^-0,14
Парафин	30	0,12
Топливо дизельное	20---100	

" Теплопроводноста соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.7. **Теплопроводности сталей** [22, 23]

Марка стали (массовый состав)	*т.* к	X%, Ет/(м.К)
Железо Армко зарубежного производства, хорошо отожженное, p(,= 0,69^ 10"' Ом^см [4]	•20.•• •••зоо--^е*ЮО---ЮОО*	36,2--^71 •72,7•••53,1•••32,3
Железо Армко p(296 К)=14,5 • 10-«0м^см [35]	300. • .6ОО^--1000^--1183-- -1673	71 .••52....32.• •32.--38
Ст. 0,8*«(0,065С; 0,4 Мп)	300-...600- ••900	88..••58.. • 33
Ст. 10*^(0,1 С; 0,4Мп; 0,17-0,37 Si)	300- ••6ОО^ ••800	83...57..• •44
Ст. 15*«(0,15С; 0,35-0,65 Мп; 0,17—0,37 Si)	300 •• •6ОО^ ••900	86...54.. •32
Ст. 20*^0,15 — 0,25 С; 0,35-0,65 Мп; 0,17-0,37Si)	300-.••600-	86•••54.. •31
Ст. 35** (0,32-0,4 С; 0,5—0,8 Мп; 0,17-0,37 Si)	300. .•600-...800	85...50.. •36

Марка стали (массовый состав) *1	T,K	λ*2, Вт/(м·К)
Ст. 45*> (0,4 — 0,5 С; 0,5-0,8 Мп; 0,17-0,37 Si)		
Ст. 65Г (0,62-0,7С; 0,9—1,2 Мп: 0,17—0,37 Si)	300--.600-.-1000	
15Х (0,12 - 0,18 с; 0,4-0,7 Мп; 0,17-0,37 Si; 0,7 - 1 Cr)		
15ХА (0,12-0,17С; 0,4-0,7 Мп; 0,17 — -0,37 Si; 0,7-1 Cr)	.600-••800---1200	
20Х (0,17-0,23С; 0,5-0,8 Мп; 0,17 — 0,37 Si; 0,7—а)		
30Х*«(О,.24-О,32С; 0,5-0,8 Мп; 0,17--0,37Si; 0,8-1,1 Cr)		
35Х*^ (0,31 - 0,39 с; 0,5 —0,8 Мп; 0,17 — -0,37Si; 0,8—1,1 Cr)	300-..600...900	
40Г*''(0,37-0,45 С; 0,7—1Мп; 0,17-0,37 Si)	300-..500..-700	65.••51•••46
35Г2« (0,31-0,39 с; 1,4 - 1,8 Мп; 0,17 - 0,37 Si)	400---700	38...36
50Г2*^(0,46 - 0,55 С; 1,4-1,8 Мп; 0,17 — -0,37 Si)	300--.600...800	43..-36...35
40ХС*"(0,37 - 0,45 С; 0,3 — 0,6 Мп; 1,2 — -1,6 Si; 1,3 —1,6 Cr)	300--.600.-.900	
15ХМ (0,11 — 0,18 с; 0,4—0,7 Мп; 0,17-0,37 Si; о,8 — 1,1 cr; 0,4 —0,55Мо)		42...39...37...31
15ХМА (0,26-0,33 с; 0,4 —0,7 Мп; 0,17-0,37 Si: 0,8-1,1 Cr; 0,15—0,25 Mo)		
30ХМ (0,26 - 0,34 с; 0,4-0,7 Мп; 0,17-0,37Si; 0,8—1,1 Cr; 0,15-0,25Мо)		
30ХМЛ(0,26 — 0,33 с; 0,4-0,7 Мп; 0,17 — -0,37 Si; 0,8-1,1 Cr; 0,15-0,25 Mo)	300...600--.800-••1200	
30ХГС(О,28-О,35 С; 0,8-1,1 Мп; 0,9-1,2 Si; 0,8-1,1 Cr)		
30ХГСА (0,28 - 0,34С; 0,8—1,1 Мп; 0,9-1,2 Si; 0,8 — 1,1 Cr)		
15Л-55Л^5(0,15-0,55 С в зависимости от марки: 0,3-0,9 Мп; 0,2-0,4 Si; 0,45-0,6S; 0,04-0,08 P)	300-•.600.••800..-1200	46.••41.••38^..33
У8*6(|,15-1,24С; 0,15 —0,35 МП; 0,15-0,3 Si)	300-••1200	50.••26
У12 (1,15-1,24 С; 0,15-0,35 Мп; <0,2 Cr; 0,15-0,35 Si) [36, с. 197-198]	300.••600-••ЭОО^^^1200	45..•37^..32...25
Р18(О,7-0,8С; 3,8-4,4 Cr; 17,5-18,5 W; 1-1.4 V: < 1 Mo)	ЗОО^^^бОО.-•900-••1200	*22-.-2&---2&---2А:*
Р12(0,8-0,9С; 3,1-3,6Cr; 12—13W; 1,5-1,9 V; < 1 Mo) [37]		16...19...26
12Х13'^М0,09-0,15С; 12-14Cr; <0,8 Si; < 0,8 Мп)	200-- -ЗОО-. -бОО^ ••900.-1400	31...31...33.••34...33

Продолжение табл. 16. 15

Марка (массовый состав)*"		
07Х21Г7АН5*® (< 0,07 С; 6—7,5 Мп; 19,5—21 Сг: 5 - 6 №; 0,15-0,25 N) [24]	10...20-.•40---80-•-300	1,7-.-3,5.-.5,9...10,2...17
15Х12В2МФ*в(0,1 — 0,17С; 0,5 — 0,8 Мп; 11 —13Сг; 1,7-2,2W; 0,6—0,9 Мо; 0,15-0,3 V)	200-••300--•900-••1400	30---31•••33..-32
18Х12ВМБФР (0,15 —0,22 С; 0,4—0,6 Мо; 0,5Si; 11-13Сг; о,4-0,7W; 0,15-0,3V; 0,2-0,4 Nb)	..300-•-600.-•900..-1400	33^..33.-^34..^32-..30
12Х18Н9Т*в(<:0,12С; 1 - 2 Мп; 17-19Сг; <0,8Si; 8-9,5 Ni; 5 • С-0,8 Ti)	••300---600-..900-.-1400	13,5...14,5--.19--.23---
12Х18Н10Т*® (<0'>2 С; <:2Мп; <0,8 Si; 17-19Сг; 9-11 №; 5-С-0,8Ti) [24, 38]	10.-.20-..40---80.--150-..300	1,5-..3,7---5,5--.8,2---•••11,0---15,1
12Х18Н10Т*' (состав тот же) [39]	• 600-••900.-.1100	15,0---19,8.-.26,6..-27,
20Х23Н18«0,1 С; <2Мп; с1 Si; 22—25 Сг; 17 - 20 Ni)	-ЗОО---600...1400	13,5.--14.-.15---18
08Х16Н13М2Б (0,06 — 0,12 С; 15 —17Сг; 12,5 - 14,5 №; 2 - 2,5Мо; 0,9 - 1,3 Nb)	•-300---600-..1000.--1400	14--.15---16..-17-..18
08Х18Н12Б «0,08 С; 0,8 Si; 1-2 Мп; 17-19 Сг; И —13Ni; 8С—1,2Nb)	-.300---600.••1000.••1200	14.--15---19.-.23--.26
10Х18Н9ТЛ «0,14 С; <1 Si; 1 - 2 Мп; 17—20 Сг; 8- 11 Ni; (С — 0,03)-5 — 0,8 Ti)	200---SCO-•-600...1000---1400	13---14.--18..-25---28
ХН35ВТ «0,12 С; 1-2Мп; 14-16 Сг; 34-38Ni; 2,8~3,5W; 1,1 - 1,5 Ti)	200-•-ЗОО---бОО--.1000.--1400	13---14-..15--.17-.-19
ХН35ВТР«0,1 С; dMn; 14,4—16 Сг; 35-38 Ni; 2,8 —3,5W; 1,1 — 1,5 Ti)		
Э11-Э13, ЭПОО—Э1300 [40j		29
Э41 - Э43А [40]		12
ЭЗЮ —ЭЗЗО [40]		15
Э45 - Э46 [40]		13
Чугуи:		
серый средней прочности		42-50
легированный		29—58
		25-54

как правило, ук; ' на округленное содержа компонента в процентах (при

Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Массовый состав, %: 99,5 Fe; 0,035 С: 0,12 S; 0,14 Мп; 0.025 S; 0,005 Р; 0,20 Си.

Сталь литая отожженная.

Сталь отожженная.

Сталь закаленная.

Эта сталь (ГОСТ 5632-72) рекомендована для образцовых мер теплопроводности (ГОСТ 8.140-82).

Таблица 15.8. Теплопроводности сплавов меди [22, 24]

Сплав (массовыП состав, %)	*Т. К*	Jv". Вт/(м-К)
Бронза:		
БрА5 (4-6 AI)	300- -••600---900	105- ••130...150
БрАЖМЦ10-3-1,5 (9-11 AI; 3-4 Fe; 1—2 Мп)	300- -•600-••800	59. ••77.. •84
БрБ2, отожженная в течение 2 ч при 7'=573 К, мягкая (1,8-2,1 Be)	4... 10...20--.40---80	2,3- ••5,0 ••.11...21. ••37
БрКд 1(0,9-1,2 Cd)	293	340
БрКМц3-! (1-1,5 Мп; 2,75-3,5 Si)	300. ••500-..700	42.- •54
БрМц5 (4,5—5,5 Мп)	300- •-500-•-700	94.. • по^•.130
БрОФЮ ! (9-11 Sn; 0,4—1,1 P)	300- ••900	34.. •52
БрОЦ4-3 (3,5-4 Sn; 2,7-3,3 Zn)	300- ••600-••900	84.. •.120
бериллиевая состаренная (3,0 Be; <0,1Fe)	20-• •80-••150-••300	18.. ПО... 170
фосфористая отожженная (18.07 Sn: 1,86 Zn; 0,16 Pb; 0,013 P)	20-. .80..•150-••300	6,0. ••20-.•.77..-190
Константан*^:		
МНМц40-1,5 (39—41 Ni; 1—2 Мп)	273-..473...573-••673	21.- •26... 31...37
зарубежного производства (55 Си; 45 Ni)	4... 10...20.••40.••80.-.300	0,8.. •3,5.. .8,8..-13- ••18...23
Копель МНМц43-0,5*2 (42,5-44 Ni; 0,1-0,5 Мп) [41]	473- ••1273	25-• .58
Латунь:		
Л62(гп; 60,5-63,5 Си)	300- •-600-•-900	110^ ••150^ ..200
Л68 деформированная (Zn; 67—70 Си)	80-. •150-••300	71". .84-.• ПО
то же	300- • •900	110. -•120
Л80 полутомпак (Zn; 79—81 Си)	300-..600...900	ПО. ••120. ..140
ЛАН59-3-2 (Zn: 57-60 Си; 2,5-3,5 AI; 2-3 Ni)	300- ••600...900	84.. -120-. .150
ЛМц58-2 (Zn; 57-60 Си; 1-2 Мп)	300-..600..^900	70.. .100-. .120
Л070-1 (Zn; 69-71 Си; 1-1,5 Sn)	300- • ••600	92.. .140
ЛС59-1 отожженная (Zn; 57—60 Си; 0,8—1,9 РЬ)	4... 10-•-20-•.40-•-SO-•-300	3,4-..10-. .19.--34....54..-120
ЛС59-1В(гп; 57-61 Си; 0.8-1,9 РЬ)	300-..600...900	ПО. ••140. --180
Манганин:		
МНМц3-12 (2,5-3,5 Ni; 11,5—13,5 Мп)	273- ••573	22.. .36
зарубежного производства [42, с. 320]	4...	0,5-..-2-•• 7.••13-.-К5-..22
Мельхиор МНЖМцЗО-0,8-1 (29-33 Ni; 0,5-1 Ре; 0,8-1,3 Мп)	300	29—37
Томпак:		
Л90 прокатный (Zn; 88—91 Си)	300- ••900	110. ••200
Л96 волоченный (Zn; 95—97 Си)	300-..800	240. ••260

Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
Сплав термоэлектродный.

Таблица 15.9. Теплопроводности сплавов никеля [22, 24, 40]

Сплав (массовый состав, %)		
Алюмель НМцАК2-2-1 (1,6—2,4 Al: 1,8-2,7 Mn; 0,85—1,5Si; 0,6—1,2 Co) [41]	293-••1073	27-••44
Инвар (35 Ni; 65Fe)	273-••573	
Монель НМЖМц28-2,5-1,5 (27-29 Си; 2-3 Fe; ,2-1,8 Mn)	***27?, •••Ш***	22^••34
Нихром Х20Н80Т (20-23 Cr; 0,4-1,5 Si)	273-••873	
Ферронихром Х15Н60 (15—18Cr; 20-25Fe: 0,4—1,5Si)		12-•18
Хромель НХ9,5*^ (9,0—10Cr; 0,6—1,2 Co) [41]	293-••1073	18-••34
НМц2,5 (2,3-3,3 М**Н**)	293	53
МНц5 (4,6-5,4Mn)	293	48
44НХТЮ (Fe: 0,4-0,8Al; 5,2—5,8Cr; 43,5—45,5Ni; 2,2—2,7Ti)	293	16
41НХТА (Fe; 0,5—1,0Al; 4,9—5,7Cr; 41,5—43,5Ni; 2,2-3,0Ti)	293	16
19НХ (Fe; 10-12Cr; 0,3-0**,6Mn;** 18-20 Ni; 0,2-0,4Si)	293	16
65НП(Ре; 64,5-66 Ni)	293	29
79НМ(Fe; 76,5-80Ni: 0,3-0.5Si: 3,8-4,1 Mo; 0,6—1,1 Mn)	293	13

температурам.

Таблица 15.10. Теплопроводности сплавов алюминия [24, 43]

Сплав (массовый состав, %)	Т, К		ВТ/(М-К)
АД1 нагартованный (примесь <0,7)	4••• 10---20I...40-- -80--1SO-•300		50^- -130-••260-••400-••250--.
АВ (0,45-0,9 Mg; 0,5—1,2Si; 0,1-0,5 Си; (0,15-0,35 Mn)	300 •••573		180- ••190
АД31 закаленный, искусственно состаренный (0,1 Ре; 0,65 Mg; 0,1 Mn; 0,38Si)	4- •.10-••20	•80-•-200	200
То же	300-673		190
АД33(0,8—1,2Mg; 0,4-0,8Si; 0,15-0,4Cu; 0,15-0,35 Cr)			140- -170
АК4(1,9—2,5Cu; 1,4-1,8Mg; 1—1,5Ni; 1,1-1,6Fe; 0,5-1,2 Si) [22]	300- ••500- •600^^^700		145^ ••**160---170^-170**
АК8 закаленный, искусственно состаренный (3,9-4,8 Си; 0.4-0,8 Mg; 0,4-1 Mn; 0,6-1,2 Si)	20-•	•••300	
То же	300 •••573^.	673	160^ ••180-••180
АЛ1 (3,75-4,5 Cu; 1,75-2,25 Ni; 1,25—1,75 Mg) [22]	300- ••400^.	600	130-
АЛ4 (8-10,5Si; 0,6-1,2Fe; 0,25-0,5Mn; 0,17-0,3Mg)	3Gr- ••**473^.**	**673**	150 •
АЛ5(4,5—5,5Si; 1—1,5Cu; 0,35-0,6 Mg)	300- ••473--	573	160-'••170-••180
АЛ8 (9,5—11,5 Mg)	300- ••473^-	673	92-' •lOO^^^llO
АМг2, отожженный в вакууме в течение 1 ч при Г = 623 К (1,8-2,8 Mg; 0,2-0,6 Mn)	**4.^-10--20 300**		4,6-- •12-^-25--49-.-77--- 100^-^130
АМг5 отожженный (4,8—5,8 Mg; 0,5—0,8 Mn; 0,02-0,1 Ti)	10- •	•150^^.300	lO^^-
То же	**300-**	673	120^ -130-••150
АМц нагартованный (1—1,6Мп; 0,7 Fe; 0.6 Si; 0,2 Ti; 0.1 Zn; 0.05 Mg)	**150^^-300**	--40-..80-••	11...
То же	300- ••**Ш--**	673	180-. -180-••190
В93 (6,3—7,3 Zn; 1,6—2,2Mg; 0,8—1,2Cu; 0,2-0,45 Fe)	300- ••473-.	673	

Теплопроводности соответствуют указ 1 температурам.

Продолo1сение табл. 15.10

Сплав (массовый состав, %)	*Т.* ***К***	>.". Бт/(м-К)
В95(5-7Zn; 1,8-2,8 Mg; 1,4-2 Си; 0,2-О.бМп; 0,1-0,25Cr)	300- ••473- ••673	155- ••160--^160
ВАЛ1 (5,5—6,2Си; 0,8—1,2№; 0,6—1 Мп; 0,15—О.ЗСг; 0,05-0,2Zn)	300- ••473- ••673	130^ **••150-^-160**
ВАЛ5 (6.5-8,5 Si; 0,35—0,55 Mg; 0,1—O.BTi; 0,15-0,4 Be)	300- ••573- •673	150^ ••160^160
НАД1 отожженный (3,8—4,5 Си: 2,3—2,7 Mg: 0,5-0,8 Мп; 0,08-0,15 Ti)	20-- •80-•• 300	30-• •6Ь^-160
БД17 (2,6-3,2 Cu; 2-2,4 Mg: 0,45—0,7 Mn)	300- ••673	130- ••170
Д1 отожженный (3,8-4,8 Cu; 0,4-0,8 Mg; 0,4-0,88 Mn)	20-- .40.•• 80^••150^ •293	30-•
Д16 закаленный, естественно состаренный (3,8—4,8Cu; 1,2-1,8Mg; 0,3-0,9Mn) Тоже	Ю-- •150^- •300	-120
Д20, закаленный, искусственно состаренный (6—7 Си; 0,4-0,8 Мп; 0,25-0,45 Mg; 0,1-0,2Ti)	300- -•573 20-• •40-•• ••300	120^ •160 27-- •38-•.61•••85-••140
То же	300•••673	140^ ••160

Таблица 15.11. **Теплопроводности сплавов титана** [44]

Сплав (массовый состав, %)	**Г, К**	ВТ/(М.К)
ВТ1 отожженный на воздухе в течение 40 мин при 7 = 873 К (0,014 С; 0,16Fe; 0.045 Si; 0,028N; 0,0092H) [24]	10-- •••150^. •300	5,5^ ••10- **..14.**
ВТ5 (4,3-6,2 Al)	300 •••673^ • •973	8,8. ••12^ ••17
ВТ6С (5,3-6,8Al; 3,5—5 V)	300^ ***••673-*** •1173	8,4^ ••13^ **..17.** ••20
ВТ8(6-7,3Al; 2,8-3,8Mo; 0,2-0,4Si) [22]	300	7,1
ВТ14 (3,5-6,3Al; 2,5-3,8Mo; 0,9—1,9 V)	300 •••673- ..973.- •1173	8,4. **••13^ ..17.** •20
ВТ16 (1,8-3,8Al; 4.5-5.5Mo: 4—5»5V)	300- ***••673-*** ••973-• •1173	**1О. -18-.** •21
ВТ3-1 (5,5-7Al; 2-3Mo; 0,8-2,3Cr: 0,15-0,4 Si) [22]	300	7,9
ОТ4(3,5-5Al; 0,8-2 Mn) 1	300- ***••673-*** ••873	9,6^ -•13- ••16
0Т41 (1-2,5 Al; 0,7-2 Mn) /		
ОТ40 (0,2-1,4Al; 0.2—1,3Mn)	300 ***•• 673-*** ••973-^ •1173	•15-- **• 18.**-•20
ОТ42(5,7-6,7Al; 1-2,3 Mn)	300 ***•• 673-*** •1173	***7,1-*** **-.18.** ••21

^^ Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.12. **Теплопроводности сплавов магния** [24, 45]

Сплав (массовый состав, %)	Г, ***К***	***к-*** ВТ/(М-К)
МАI (1,3-2,5 Mn)	300-• ***•473-*** ••673	126-• -138- ••134
МА2(3-4AI; 0,15—0,5 Mn; 0,2—0,8 Zn)	ЗОО^- •473- ••673	***96---*** 105-• 113
МА2-1*М3,8-5А1; 0,4—0,8Mn; 0,8—1,5Zn; 0.1 Ca)	20-•• 300	***13---*** 96
МАS (7,8-9,2 Al; 0,15-0,5 Mn; 0,2—0,8 Zn)	300	59
МА8*3 (1,5-2,5 Mn; 0,15-4.35 Ca)	300	130
МАИ (1,5-2,5 Mn; 2,5-3,5 Nd)	300 ***•• 473-*** -•673	110^^ •117^ ..117
МА15 (2,5-3,5Zn; 0,45-0,9Zr) [46]	300	110
^65-1 (5-6 Zn; 0.3-0.9 Zr)	300 ••473. ••673	117^- .126^ ..126
ВМД1 (1,2-2Mn; 2,5-3,5 Th)	300	130
ВМС1(3-4AI: 1,2-2 Zn; 0.4-0,9 Zr)	293	96
МЛ2*« (1-2 Mn)	293	130

Продолжение табл. 16. 15

Сплав (массовый состав, %)	*Т.* к	Х*». ВТ/(М-К)
МЛ3*^ (2,5-3,5 Al; 0,15—0,5 Мп, 0,5-1,5 Zn)	293	105
МЛ4*5 (5-7 Al; 0,15-0,5 Мп: 2-3 Zn)	293	80
МЛ5*5 (7,5—9 Al; 0.15—0,5 Мп; 0,2—0,8 Zn)	293	77
МЛ6*" (9-10,2 Al; 0.1—0,5Мп; 0,6-1,2Zn)	293	77
МЛ8 (5,5-6,6 Zn; 0,7-1,1 Zr; 0,2-0,8 Cd) [46]	293	120
МЛ10*о (0,1-0,7 Zn; 0,4-1 Zr; 2,2-2,8 Nd)	293	110
МЛ12"(4-5гп; 0,6—1,1 Zr)	293	130
МЛ14*' (1,7-2,3 Al; 0,5-1 Zr; 2,6—3,8 Th)	293	110
МЛ15*' (4-5 Zn; 0.7—1 Zr; 0,6-1,2 La)	293	140
ВМЛ1*в (0,5-1 Zr; 2,5-4 Th)	293	110

Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
Отожженный в **течение** 30 **мин** при Т = 533 К-
То же при *Т* = 623 К-
Литой.

Закаленный.
Закаленный и состаренный.
Состаренный.

Таблица **15.13. Теплопроводности жаростойких и жаропрочных сплавов и сплавов на основе тугоплавких металлов [7, 22]**

Сплав (массовый состав, %)	*т*, к	Вт/(м-Ю
ХН60В (Ni; CO,1C; 23,5-26,5 Cr; 0,3-0,5Ti; <0,5 Al; 13-16 W; 4 Fe)	200-• •300- ••600-- •1000	9,0^ ••9,8-••14-..23
ХН60Ю «0,1 С; 15-18 Cr; 2,6-3,5 Al; <0,3 Мп; <0,8 Si; 55—58 Ni)	200-- •300- ••800-- •1400	8,0-
ХН70ВМЮТ (Ni; <0,12 С; 13-16 Cr: 2—4 Мо; 0,1-^ 0,5 V; 5-7 W; 1,8-2,3 Ti; <5 Fe; 1,7-2,3 Al) 1	200-• •300- ••800-- •1400	7... 8-••18.--24
ХН70ВМТЮ (Ni; 0,1-0,16 С; 14-16 Cr; 1-1,4 Ti; (1,7—2,2 Al; 4—6 W; 3—5 Mo) >		
ХН77ТЮ, ХН77ТЮР (Ni; 19-22 Cr; 2,4—2,8 Ti; 0,6-1 Al)	200-• •300-• •600-- •1000	И-- .12---16---24
ХН78Т (Ni; 0,12 С; 19-22 Cr; 0,15-0,35 Ti; 0,15 Al; IFe)	300-- •900	•23
ХН80ТБЮ(Т1; <0,08 С; <1 Мп; 15—18 Cr; <3Fe; 1-1,5Nb; 1,8-2,3Ti; 0,5-1 Al)	200-- -ЗОО- .•800-- -1400	1Ь- •12-^-21---27
МВ50 (W; 47,5—50 Cu)	573-- •773-• •973-- •1173	90--
ВР20*2 (W; (20+0,5) Re)	523-- •773-. -973-• -1173	50- -54...63-••75
ВМ1 (Мо; 0,01 С; 0,08-0,25 Zr; 0,4 Ti) i		
ВМ2 (Мо; 0,02 С; 0,25—0,4 Zr; 0,2 Ti)	373-- •773-• •1473- --2173	130- ••120^-110--90
ВМ3 (Мо; 0,25-0,5 С; 0,3-0,6 Zr; 0,8-1,3Ti;f 1-1,8 Nb) **J**		
ЦМВ30 (Мо; 0,01 С; 30 W)	673-• •973	120- ••100
NbsSn, сверхпроводник-((70,5±0,05)№), Г^=18,3К[47]	4---е ..20--	0,02

Таблица **15.14. Теплопроводности сплавов на основе благородных металлов [24]**

Продолжение табл. 15.14

Сплав (массовый состав, %)	*Т.* к	Хэ', ВТ/(М-К>	Сплав (массовый состав, %)	*Т*, к	Х«, ВТ/(М-К)
Ag—Cu (92,5 Ag; 7,5 Cu)	300	350	Ag—Au зарубежного про-		
(90 Ag; 10 Cu)	300	345	изводства (99,63 Ag;		
(80 Ag; 20 Cu)	300	340	0,37Au)*3, *4[7]		
(50 Ag; 50 Cu)	300	310	(90Ag; lOAu)	300	200
Ag—Pd (95 Ag; 5Pd)*2	300	220	(30Ag; 70Au)	300	290
(90 Ag; 10Pd)*2	300	^92	Ft—Rh(90Pt; 10Rh)*M361	300-400	30
(80 Ag; 20Pd)*2	300	35	Pi—Ir (90Pt; **lOIr)*»**	300	30
(50 Ag; 50 Pd)*2	300				

Продолжение табл. 15.14

Сплав (массовый состав. %)	*Т.* к	Вт/(м . К)
(80Pt: 20Ir)*5	**300**	**18**
(70Pt: 30Ir)*5	**300**	**16**
Au—Fe зарубежного производства, отожженный, р(ЗООК)/Ро = **=9,0** (Ли; **0,03** Fe)*^*^ [7]	**4---10 •--20-- •40-•• ...80-. •300**	**-210 •••240-• •••250-••310**
Au—Co зарубежного производства, холоднотянутый (Au; **2,1** Co)*^. [7]	4-...10. **•••20-- .40... ...80-- •100**	

^ Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
" Механически обработан в холодном состоянии.
' Сплав термоэлектродный.
• Атомный состав, %.
> Штампован в холодном <

Таблица 15.15. Теплопроводности сплавов на основе радиоактивных металлов [22]

Сплав (массовый состав, %)	*Т.* к	ВТ/(М-К)
U-Al (99 U; 1 Al)	200^--300---900	14...И-... ... 13 g
(90 U; 10 Al)	200--^300-^^900	lo-^^io... •-^9,8
(70 и; 30 Al)	200^--300---800	3Ь^'зо^^-28
(50 и; 50 Al)	•••500^^^700	•••54...34
(10U; 90 Al)	300	190
UAlj, Y==6,8г/СМ3	300	26
UjSi, •/ = 15,6г/см3	300	20
U,Si„ 7=12,2 г/смз	300	14
U-Cr (95U; 5Cr)	300	21
(90 U; 10Cr)	300	17
(70 и; 30 Cr)	300	10
(SOU; 50 Cr)	300	8,5
(30 U; 70 Cr)	300	16
U-Fe (95 U; 5Fe)	300	24
(90 U; IOFe)	300	22
(70 U; 30Fe)	300	17
(50 U; 50 Fe)	300	20
(30 U; 70 Fe)	300	33
U-Zr (95 и; 5Zr)	300	19
(90 U; 10 Zr)	300	14
(70 U; 30 Zr)	300	6
(SOU; 50 Zr)	300	5
(30 U; 70 Zr)	300	6
U-Mo (95 U; 5 Mo)	300	25
(90 U; 10 Mo)	300	23
(70 U; 30 Mo)	300	27
(50 U; 50 Mo)	300	40
(10 U; 90 Mo)	300	110
UBi	300	21
m	300	19
UBi,	300	17
(65U + 20Pu + 5Mo + 10 продуктов деления)	479^.-808--^868	*15---23---22*
(70U+20PU+10 продуктов деления)	323---573--- ...873-••1073	*9,6---m--•* •..24-••3O

Продолжение табл. 15.15

Сплав (массовый состав, %)	г, к	ВТ/(М . К)
Th-U (90 Th; Ю U)	323 •••1073	36 •••44
(80 Th; 20 U)	323^- •1073	35- ••43
(Zr + 8U)	373 ••-723	14. ••17
(Zr+8U + 1 H)	373-• •673	20- ..18...17

и подшипниковых материалов [46]

Сплав (массовый

Алюминиевые антифрикционные сплавы

АН2,5(А1; 2,7—3,3№)
А06-1 (Al; 5,5—7 Sn; 0,7—1,3Cu; 0,7-1,3№)

БКА (Pb; 0,95-1,15Ca; 0,7—0,9Na; 0,05-0,2 Al)
Б16 (Pb; 15-17 Sn; 15-17 Sb; 1,5—2 Cи)
Б83 (Sn; 10-12Sb; 5,5-6,5 Cu)
588 (Sn; 7,3—7,8Sb; 2,5—3,5 Cu; 0,8-1,2 Cd; 0,15-0,25 Ni)

Припои

ПОС61 (Pb; 60—62Sn)	300	50
ПОС18 (Pb; 18Sn; 2,5Sb) [22]	300	38
nOCCyl8-2 (Pb; 17-18 Sn; 1,5—2,0 Sb)	300	34
ПОССу40-2 (Pb; 39-41 Sn; 1,5-2,0Sb)	300	42
(60 Sn; 40 Pb) [24]	4...10..	
	80-••	•-•51- ••49
	•••300	-••50
Сплав Вуда (50Bi; 25Pb; 12,5Cd; 12.5Sn) [24]	4...10..	.11.
	...80.•• 100	•••18. ••20
		••-23- ••24
Сплав Розе (56,1Bi; 28Pb; 15,9Sn) [24]		•••8,4
	•273	...11. ••16
nCp25 (Zn; (25+0,3) Ag; (40±1)Cu)	300	105
nCp44 ((44+1)Ag; (27±1)Cu; (16±2)Zn; (8+1)Cd; (2+0,5) Ni) (3+0,5) Mn)	300	38
nCp70 (Zn; (70+0,5) Ag; (26+0,5) Cu)	300	170

Теплопроводности соответствуют указав >М температурам.

Таблица 15.17. Теплопроводности полупроводников, Вт/(м-К) [7, 25]

Полупроводник	*T*, К					
	10	20	40	80	150	300
CdgAsi нелегированный, п = 2-10« см-з	—	—	—	—	2,7	2,8
CdSb^^jD-типа, п = (3 Ч- 5)• 10l® см-з,	–	–	–	4,9(100 К)	3,0	1,9
Zn1b, чистота исходного материала 99,9999%	260	210	40	11,5	5,2	5,0
ZnO*i, концентрация примесей <2,5-10^8 см •• [48]	300	520	450	260	134	54
ZnS, гексагональная структура, концентрация примесей < 5-101' см-з [48]	300	380	310	155	70	27
CdS, концентрация примесей > 10" см"®,	540	360	200	97	43	20
CdSe и-типа, чистота исходного материала> >99,99%, нелегированный, || оси с	230	200	72	32	–	—
CdTe, концентрация примесей < 2-lOi® см " 1^:0]	520	250	117	**44**	**18,4**	**7,5**
HgSe и-типа, п(4,2К) = 2,1-10" см"" [49]	120	93	41	11	4,4	1.7
HgTe р-'типа, концентрация акцепторов ЮИ — 10l» см-з	—	–	25 (60 К)	14	5,0	2,6
BN*2 [50]		2,0	10	43	112	**180**
A1N*3 [50]	65	100	175	290	330	**200**
AlSb р-типа, ***R*** (300 К) = 7,0 см^/Кл	72	280	330	210	115	69(250 К)
GaP р-типа, ***R*** (300 К) = 75 см^/Кл	190	590	700	450	210	140(250 К)
GaAs л-типа, и (77 К) = 2-10" см-з	1400	2500	780	270	105	58
GaSb р-типа, «=1,5-10" см-з	140	340	320	180	85	36
InP п-типа, ***n*** (77 К) = 2-10" см-®	1800	2700	1200	470	190	70
InAs л-типа, я(77К) = 3-10« см-з	2900	1700	600	170	–	–
InSb «-типа, п=7-lOi^ см-з	2000	1100	370	90	42	—
SiC и-типа, концентрация атомов N lOi' см-з, Ⅱ оси ***c***	350	1900	5100	4100	1500	490
PbS р-типа, и (300К) = 1,7-1018 см-з	70	48	13	8,0	—	–
PbS природный, ***n*** (300 К) = 1,48-10" см-з	–	–	—	5,5(100 К)	3,9	2,6
PbSe р-типа, и (300 К) = 5,4-10" см""	70	37	11,5	5,2	—	—
PbSe w-типа, я = 6,4-10" см-з, легированный Си	—	—	—	5,0	3,0	1,8
BiaTeg я-типа, ***n*** (77 К) = 3-10" см-з			—	6,4	3,5	2,9

Приведены средние значения теплопроводности ZnO гексагональной струкутры: X^p = 1/3 + 1J, где и — теплопроводности вдоль осей *а ис* соответственно: для 30 < Г < 300 К X^A^ = 1,2.

Горячепрессованная поликристаллическая керамика плотностью 97% теоретаческой. размер зерен 20 мкм, концентрация примесей О и С меньше 2-lE-» см-^

Синтетический монокристалл, атомное содержание кислорода (1 5)10^» см"'.

Обозначения: «-концентрация носителей тока; Н— постоянная Холла.

Таблица 15.18. Теплопроводности некоторых диэлектрических монокристаллов, Вт/(м-К) [7, 25]

Кристалл (атомное содержание, %)	*T*, к						
	4	10	20	40	so	150	300
BeO [50, 51]	47	750	5100	13 500	6700	1360	370
MgO	270(6 К)	1100	3000	2200	460	135	58
AlaOg*!	240	3000	12 500	13 500	1100	125	40
Сапфир*^, II оси ***c***	125	2300	10000	11500	1100	155	47
Si02*3, II оси *c*	470	2700	530	150	**CO**	27,3	14,3
TiO^	180	1750	600	65	18	–	–
Niol	5	60	220	430	280	120	38
UO^*^	8,6	9,6	1,65	1,4	4,2	7,7	8,4
LiF:							
(0,02» Li)	510	6000	10000	1380			
(7,4в Li)*e	440	2700	2800	930	127	–	–
(50,1 «Li)	370	1900	1800	700	115	37	–
NaF*e, II [100]. [52]	750	10 000	14 000	620	130	–	–

Кристалл (атомное содержание, %)	*T*, К						
		ID	•2о	40	80	1S0	300
CaFj, II [100]	700	2600	1 2800	570	60	22	12,5
MnFj*, II оси *a*	67	430	450	135	40	16	7,7
CoF,*8	4,2		27	19,5	25	15,5	
NaCl	530	900	*Ю*о	80	34	15,5	7,4
KCl	630	510	225	70	20		
RbCl	310	190	85	30	11	–	
NaBr	95	160	70	27	13	–	
KBr	480	250	90	34	15,5		4,8
KI	700	360	130	39	12		5,02
SrTiO,*», II (100)	1,5	8,5	20	19	18	16	12
YsFeA.*'». II [100]	13,5	125	220	112	37	15	7,4

Размеры образца: диаметр 5 мм, длина 50 мм.
« Концентрация примесей Cr, Fe, Mg, Si меньше 10-S см-'.
Размеры образца 5X5X40 мм.
•« Антиферромагнетик при T< 30 К.
•» Нормальный изотопический состав.
" Атомное содержание примесей меньше МО-» СМ-», сечение Образца 5.1X5,1 мм.
*' Антиферромагнетик при T < 67 К-
*» Антиферромагнетик при T < 38 К, ось образца составляет угол 26° с осью *с*.
Параэлектрик, температуры переходов 35. 65 и ПО К-
Ферримагнетик при T< 560 К. средний диаметр образца 3,9 мм. длина П. 3 мм.

Таблица 15.19. Теплопроводности стекол [24, 53]

		Вт/(м-К)
Кварцевое стекло (плавленый кварц)	4...10...20---40---80---10	O,13...0,135...O,16-..0,25. ...O,52...0,70
То же [54]	60-••80...160-••300-••500-..•800-••1100	0,41...0,52...0,96"..1,36.. ...1,63...1,81...1,98
То же, КВ [38]	60.-.70...80...90	0,45...0,52.-.0,58...0,64
КРОН:		
легкий ЛК5	90...150..-300	0,52. **•0,87...1,2**
баритовый серии 100БК1 Ю	293	0,75
Стекло:		
боросиликатное С38-1 (ЗС-9)	300	0,92
боросиликатное С39-1 (№ 17)	300	1,3
боросиликатное С47-1 (№ 46)	300	0,84
боросиликатное (пирекс) (80 SiO_2; 13B2O8; 2A120з;4(Ka20 + K20))	20...80..-150...300	0,142-. 0,54...0,84... 1,34
известково-натриевое	20.••80..•150.-.300	0,142.. 0,46..-0,70-.-1,05
свинцовое тугоплавкое (40—50 РЬО)	20-..80-••150-•-300	0,142-. 0,36.--0,51..-0,71
Фарфор) [55]	•.150...300..-500-...-700. 1140	0,96-•• ,35-.-1,68-.-1,72.. ...1,81 .-2,25
Фаянс разных сортов	300	0,93-1
Флинт:		
тяжелый ТФ1	90...150...J	O,34...0,52.-.0,70
баритовый БФ8	293	0,81
Хрусталь, 1 = 2,6 -i- 2,85 г/см^ [15]		0,88-0,91

температурам.

Таблица 15.20. .Теплопроводности плотных (пористость /7 = 0%) спеченных оксидов [22J*i

Оксид	7, г/см"	*т,* к	X*^ Вт/(м.К)
АЬОз	3,7-3,8	400---700--- •••1100---1500.-- •••2000	...5...7
BeO [51]	3,01	400- •••2G00	
CaO	3,0-3,1		15...9.••6..-8
SiO,	2,3-2,6	•••1500---220П •••!300--^1500	
MgO	3,3-3,5	400-••700-••	36...16-..8.. •
.ViO	5,0-5,1	•••2000 •••1700	
TlOг	4,0-4,1	400-••700-••	
ZrO,	5,2—5,3	•••1500 400т^900^-- •'•1500^--2000	

Экспериментальные да теплопроводности оксидов с
е в [и[³1.
! Теплопроводности соответствуют указа температурам.

Таблица 15.21. Теплопроводности пресованных и спеченных карбидов [22, 57]

Карбид	Y, г'СМ-i	*Т,* к	X*„ ВТ(М*К)	b
B4C	2,32—2,5	300---HOC	28---13	I
Be,C (в Аг)	2,2	300^^-900	32.••18	!
	6,68	293	13	;
A .	6,97	293	18	;
HfC	11,8-12,6	573- • • 1473	9-^-17	;
MoX	9,18	293	7	;
NbC	7,82	•••2500	14...44.-.44	}
NbaC	7,85	400	19	
SiC	3,2	•••600^--1000--- •.•ISOO-•^2500	...12...14	
ГаС	14,5	573^^-1673--- •••2673	34...40--.38	
	15,5	293	36	;
	4,72-4,92	523^-^973	33...11	
VC	5,48	293	25	
WC	15,65	293	29	
W X	17,3	293	36	
ZrC	6,7	573-••1673-•• •-•2673	53^..35...38	(

Теплопроводности і ветствуют указанным температурам.

Таблица 15.22. Теп-попроводности прессованных и спеченных боридов, нитридов и си.чицидов при комнатной температуре [22]

Соедикение		X, Bt/(M-K)	Соединение		X, ВТ/(m.K)
BaB„		36	M03N	9,9	50
CaBg		23	NbN	8,4	10
CrB,	5,6	22	TaN	13,8	23
Mo.Bs	8,0	27	TiN	5,21	29
NbBa	6,0	17	VN	6,04	31
SrB«	_	26	ZrN	7,35	14

Продолжение табл. 15.22

Соеди нение	гДм»	X, Bt/(m.K)	Соединение	Г/СМ»	BtMm-K)
TaB^	11,7	11	CrSi.,	4,4	6
TiB,	4,5	24	MoSia	6,3	29
W^Ba	11,0	32	NbSi,	5,45	26
ZrB,	6,1	23	TaSi,'	8,83	12
CrN	5,9	32	TiSi,'	4,35	13
Cr„N	6,5	60	WSia	9,33	19
M6N	8,6	16	ZrSi,	4,88	18

Таблица 15.23. Теплопроводности п.потных обожженных огнеупооов при атмосферном давлении [58]

X. Вт/(м-К). при *t,* °С

Изделие (массовый						
Из кварцепого стекла 97 SiOj)	2,2-2,09	0-3	1,4	1,9	3.0	4,5
	1,67-1,50	24-30	0,42	0,34	0,46	0,94
Линасовые (> 93 SiOj)	2,10-1,93	10-16	1,6	1,7	1,9	2.3
Динасовые с добавками (60 С SiOg < 93)	2,14-1,99	16-20	1,25	1,4	1,8	2,1
Полукислые (< 28 Al2O3; < 85 SiOa)	1,95—1,80	24—30	0,85	0,92	1.1	1,2
Шамотные **(28 < Al,Oз** с 45)	2,16—1,92	16-20	**0.88**	0,94	**1,1**	1,2
Муллитокре-чиеземестые (45 < AI2O3 < **62**	2,45-2,26	16-20	1,4	1,4	1.4	1.4
Муллитовые **(62 <** AljOg **< 72)**	3,00-2,85	0-3	5,6	4,9	4,1	3,8
	2,52-2,34	20-24	1,2	1,3	1.5	1,7

Продолжение табл. 16. 12

Изделие (массовый состав. %)	$f_{\text{г}}$, г/см=, при i =20	%	г. $B_{\text{т}}$/(м-К), при 200	*400*		1200	
Муллитокорундовые (72 < AI2O3 < 90)	2,89-2,68	16-20	2,7	2,6	2,4	2,3	2,3
Корундовые (глиноземистые) (>90 AI2O3)	3,9-3,7	0-3	20	12,8	6,7	5,2	6,2
	3,12—2,89	20—24	4,1	3,5	2,7	2,4	2,5
Периклазовые (> 90 MgO)	3,55-3,37	0-3	26	17	8,3	5,6	6,2
	2,84-2,63	20-24	5,7	4,8	3,4	2,7	2,7
Форстеритовые (50 < MgO < 65; 25 < SiOa < 40)	3,36-3,19	0-3	4,5	3.9	3,1	2.9	3,3*2
	2,69-2,49	20-24	3,3	2,8	2,0	1,8	—
Карбидкремниевые на различных связках (>70 SiC)	3,13-2,97	0-3	35	32	27	22	19
	2,50-2,32	20-24	13	12	9,7	8,1	7,2*2
Бадделеитовые (> 90 ZrOg)	5,80—5,51	0-3	1,8	1,7	1,7	1,9	2,3
Циркониевые (>50Zr02; >25 3Юг):							
плавленые	3,40-3,14	20—24	1,8	1,6	1,4	1,3	1,25*2
поликристаллические	4,60—4,37	0-3	5,7	5,1	4,3	3,9	4,0
	3,86—3,59	16—20	4,6	4,2	3,5	3,2	3,1

Пористость открытая.
! При г = 1500° С.

Таблица 15.24. **Теплопроводности высокотемпературных композиций ядерного топлива** [22]

Соединение (массовый состав, %)	т, г/смз	т. к	Вт/(м.К)
иОа, спеченный диоксид [59]	10,97	300---бОО---1000- -•1600- •••2600-•-3120	
ТЬОг, спеченный диоксид, 77= 0%	9,96	400-- •500-- •700-• •1100-- •1800	8,2-. •2,0
РиОг, спеченный диоксид, 77 = 0%	11,46	200.- .300.• •700-- •ПОО^. •1500	*7,2°* •3,Ь- •2,2
(50 UO2 + 50 РиОг)	11,1	300	4,3
(6OUO2 + 4OAI), спеченная смесь	4,9	300	7,0
(47 иО? + 53 BeO), спеченная смесь	3,2-3,6	300	23-3J)
(19,9002 + 80,1 С), спеченная смесь	1,93	300	18
(60и02 + 40м0)*2	–	373-• •1273	32.- •27
(50U02 + 50W)*2	–	373-• •773-• •1273	•44-••42
(2OUO2 + 80 полиэтилен)	–	273-- •363	0,31 •••0,24
(2OUO2 + 60 полиэтилен + 20 сажа)	–	273-• •363	0,37 •••0,33
U3OS	7,90	300	6,8
ис	–	373-• •1100	**25-•** -22---27
иСа	10,8	473-. -1873	13^^ •20
(30,3иС + 69,7С), спеченная смесь	2,22	300	57
UN(94,3U; 5,32 N, 0,034 C; 0,047 0)	14,02	473-•••1073	16^^ •21
US	10,87	300	11
PuBei3	4,36	300	90

Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
Объемное содержание. %.
Обозначения: Л — пористость.

Таблица 15.25. Теплопроводности строительных материалов при < = (25 ± 5)°С и атмосферном давлении 122, 23]

Материал	г/см»	л, Вт/(м-К)
Алебастровые плиты	1,25	0,47
	0,84	0,27
Асбошифер	1,9	0,35
Асфальт	1,8	0,72
Бетон в сухом состоянии:		
на песке и кирпичном щебне	1,82	0,70
на каменном щебне	2,0	1,3
железобетон [60]	2,4	1,6
пенобетон	0,3	0,12
	0,8	0,33
Гипс строительный [60]	1,25	0,35
Грунт сухой (влажный) [60]:		
глинистый и суглинки	1,6	0,87 (1,7)
	2,0	1,7 (2,6)
пески и песчаный	1,6	Ы (1,9)
	2,0	2,0 (3,2)
скальный	2,0	2,0 (2,7)
	2,4	2,3 (3,5)
Гудрон	0,95	0,30
Доломит плотный в сухом состоянии	2,48	1,7
Зола древесного топлива	0,7	0,15
Известняк плотный в сухом состоянии	2,32	1,9
Картон:		
плотный	1,0	0,23
обыкновенный	0,7	0,17
гофрированный в несколько слоев при толщине слоя 5 мм	0,09	0,07
Кирпич в сухом состоянии:		
кликерный	2,25	1,6
красный плотный	1,8	0,67
красный пористый	1,2	0,44
кремнеземный	0,5	0,12
силикатный	1,9	0,81
трепельный	1,13	0,27
шлаковый	1,4	0,58
Песок сухой	1,6	0,87
Раствор:		
портландцементный (без песка)	1,8	0,47
цементно-песчаный	1,8	1,2
известково-песчаный	1,8	0,87
Рубероид	0,6	0,17
Толь бумажный	0,5	0,23
Шлак:		
котельный	1,0	0,29
	0,7	0,19
доменный гранулированный	0,5	0,15

Таблица 15. 26. Теплопроводности древесных материалов [15, 22]

Материал	7. г/см'	t. °С	Хо', Вт/(м.К)
Бальза	0,11-0,13	30	0,043-0,052
Береза	0,72	20	0,15
Дуб	0,825	15	0,20
Ель	0,45	60	0,11
Кедр красный	0,47	20	0,095

Продолжение табл. 16. 15

Материал	7. г/см»	t. °С	Вт/(мЮ
Клен	0,72	30	0,19
Лиственница	0,6	20	0,13
Пробковое дерево	0,113	30	0,045
Сосна:			
поперек волокон	0,545	15	0,15
вдоль волокон	0,545	15	0,40
Тополь	0,58	50	0,17
Фанера	0,6	20	0,15
Опилки в качестве засыпки	0,25	20	0,093
Стружка в качестве набивки	0,30	20	0,12

" Теплопроводности древесины приведены в направлении, перпендикулярном волокнам. Теплопроводность вдоль волокон в 2—3 раза выше теплопроводности поперек волокон. Влажность материалов 7 — 10%. Теплопроводность сухой древесины, Вт/(м-К). можно оценить по формуле X ~ 0.0232 + 0.174 7. где 7 — плотность древесины, г/см®.

Таблица 15.27. **Теплопроводности строительных теплоизоляционных материалов при атмосферном давлении [60]**

Материал	7, г/см»	*шах. -с	10-= Бт/(м-К)
Альфоль:			
гофрированный	0,02-0,04	350	59+0,26/
гладкий	0,02-0,04	350	**53+0,22<**
Асбестовый матрац, заполненный:			
совелитом	0,28	450	87+0,12/
стекловолокном	0,20	450	58+0,23/
вермикулитом	0,22	450	81+0,23/
Асбестовая ткань в несколько слоев	0,5-0,6	450	120+0,26/
Асбестовермикулитовые изделия (плиты, сегменты, скорлупы)	0,25	600	81+0,23/
	0,30	600	88+0,23/
Вермикулит, вспученный в засыпке	0,23	900	70+ 0,27/
Войлок:			
строительный	0,20	100	44+0,19/
утеплительный	0,10	100	60+ 0,23/
эластичный из минеральной ваты	0,115	600	43+0,22/
Вулканитовые изделия (плиты, сегменты, скорлупы)	0,35	600	79+0,15/
	0,40	600	84+0,15/
Диатомитовые изделия	0,5	900	100+ 0,23/
	0,6	900	140+ 0,23/
Известково- кремнеземистые изделия (плиты, сегменты. скорлупы)	0,2	600	69+0,15/

Продомкение табл. 15.27

Ма териал	*y,* г/см»		10-\Вт/(м-К)
Мастичные материалы:			
асбзурит-600	0,60	**900**	160-1-0,17<
асботерми!	0,57	500	130-Ь0,И
совелит	0,50	500	99-1-0,1/
ныовель	0,37	350	77-1-0, И
Маты и полсюы из непрерывного стекловолокна	0,20	450	40-1-0,26/
Минеральная вата:			
марки 75	0,115	600	44-1-0,29/
марки 150	0,23	600	53-fO,19<
Пенодиатомитовые изделия, кирпич:			
марки ПД-350	0,35	900	814-0,19/
марки ПД-400	0,40	900	93-1-0,19/
Перлитовые изделия иа керамической связке (плиты, сегменты, скорлупы):			
марки 250	0,25	900	70-1-0,19/
марки 400	0,40	900	99-ю, 19/
Перлнтоцементные изделия (полуцилиндры, плиты, сегменты):			
марки 250	0,25	600	70-1-0,19/
марки 350	0,35	600	81-1-0,19/
Перлит вспученный мелкий:			
марки 75	0,09	875	52-fO,12/
марки 150	0,18	875	58+0,12/
Пенобетоиные изделия	0,40	400	110+0,3/
	о,ао	400	**130+0,3/**
Пенопласт ФРП-1 и резонен:			
группы 75	0,065-0,085	130	41+0,23/
группы 100	0,086-0,11	150	43+0,19/
Плиты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем:			
марки бО	0,055-0,075	400	40+0,29/
марки 175	0,15-0,21	400	52+0,2/
Совелитовые изделия (полуцилиндры. плнты, сегменты):			
марки 350	0,35	500	75+0,15/
марки 400	0,40	500	78+0,15/
Торфоплиты, сегменты, скорлупы	0,275	100	64+0,15/
	0,35	100	76+0,15/
Холст стекловолокнистый ВВ-Г	0,10	180	38+0,15/
Холсты из микроультрасупертонкого штапельного волокна горных пород	0,03—0,07	700	41+0,29/

" Максимальная температура, при которой

Таблица 15.28. **Теплопроводности некоторых теплоизоляционных и вспомогательных материалоа** [15, 24, 61]

Материал (массовое содержание. %)	г/см'		10-» Вг/ІМ-К)
Асбест волокнистый	0,47	-200- ••20	81-. •160
	0,70	-200- .-20	150- --240
Ацетилцеллюлоза	1,32	20	200-300
(60 аэрогель-В 40 алюминиевой пудры)	0,18	—180</<20	0,35
Бумага толщиной 75 мкм [221	0,73	20	96
Вата:			
минеральная	0,10	-200- --20	16-• -47
	0,25	-100- --20	36-. •57
стеклянная	0,15	-173- --27	20-• •52
хлопковая	0,05	—200- --20	**26,-** •59
	0,081	-200- •-20	32-- •59
Войлок:			
графитированный (вакуум, *d* = = 10 ^ 20 мкм)	0,04-0.12	1000-• -1800	400- • -1200
графитированный углеродный (аргон)	0,05—0,10	20-•-800	80-- • 280
из карбида циркония (аргон, d= = 16 мкм, *Л* = = 80%)	–	200-•- 1800	800- -•1200
стеклянный	0.05	-200- •-20	14.. •44
Волокно:			
базальтовое	0,12	20---400	38.. -78
каолиновое (*d* = = 4 мкм)	0,10	200--• 1100	60-- -380
Ипорка'^^	0,015	20	38
Картон теплоизоляционный БТК-1	–	-260- ••0	23-- •39
		750	84
Каучук:			
натуральный	0,086	50	42
фторированный ФК-20	0,18	-200- ••20	23-- -59
вспененный отвержденный	0,082	-190- ••20	15.. •33
Кожа	1,0	20	170
Лед	0,9	0	2200
Майлар (лавсан)	–	-200- ••20	110- .-150
Пенолегковес высокоглиноземистый (аргон)	0,80	200-•- 1400	400- ..480
Пенопласт:			
ПС-1 ($d_{„oP}$ = = 0,5 мм)	0,10	-170- ••20	15-. •4П
	0,07	-170- ••20	18-. .44
" t v i ' z r			
Пенополиуретан:			
ППУ-104Б	0,39	-170- ••**20**	38-• •67
ППУ-305А	0,14	-100- --20	25-- -43
Пеностекло	0,17	-180- •-20	49-- -62
	0,25	-180- -•20	61-- -80
Перлит (**воздух. *p*** = = 0,13 Па)	0,20	—190</<20	0,83

Продолжение табл. 15.28

Материал (массовое содержание, %)	*и*	'С	Ю-:! Вт/(м-К)
Плексиглас аморфный прозрачный	1,174	—190- ••0	150-• •200
Плитка теплоизоляционная ПМТБ-2	—	-260- •-•О-- •750	
Полистирол	1,06	20	82
Поролон	0,034	-190- -•20	40
Порошок:			
А1.203(^=0,21ММ, Л=51 %)	—	200-•• 800	360-. •600
Mg0(d=0,18 мм. Л=42 %)	—	200-•• 800	480^. •780
Zr03(d=0,20 мм, Л=42 %)	—	200-•• 800	250-• •450
Пробка измельченная (d<3 мм)	0,037	-200- ••20	4
	0,161	—70-. •27	50
Резина;			
натуральная	—	-180- ••20	150
синтетическая	—	-200- ••20	120^- •170
Слюда;			
мусковит. _L пла;кости спайности	2,8	30	550
плоскости спайности	2,8	30	3400
флогопит, J_ плоскости спайности	2,8	20-•-600	450 •••570
Снег [62]	0,25	0	160
Стеклотекстолит, _L армирующим слоям	—	-223. ••20	190-• •390
Тальк (воздух, *р*= = 0,13 Па)	1,2	-180 < « <20	1,6
Тефлон	2,12	-190. ••10	230-• •260
Ткань:			
из кварцевого волокна (d = 6 8 мкм, толщина слоя 0,4 мм, 7 = = 0,34 кг/м'^)	—	200-•• •••600-- •1000	120-• •..180 .'..290
углеродная графитированая (аргон, *d* = = 5 мкм, толщина слоя 0,45 мм, 7 = =0,33' кг/м'^)	—	200-•• ...1000--- ..•1800	130. • •••270 •••460
Шелк	0,10	0	40
Эбонит [22]	1,2	20	160
Эбонит вспученный	0,064	—100. ••20	32
Экранная теплоизоляция:			
алюминизированная с одной стороны лавсановая • пленка толщиной 5—12 мкм с рифлением Зх Х3 мм и стеклоуаль ЭВТИ-7 (15 экранов на 1 см, р= 10—®Па)	0,022	-200 < « <20	0,1
ниобиевая фольга толщиной 15 мкм с рифлением в виде шаровых сегментов высотой 0,05—0,1 мм (20 экранов на 1 см, вакуум)	—	800... •••1000-•• •••1200	42...77.-. •.•130

Продолжение табл. 16. 15

Материал (массовое содержание, %)	г/см®	*t. "С*	10-' вт/(м KI

Теплопроводности немонолитных материалов приведены для воздуха при давлении 1,01-10^ Па, если среда и давление не указаны явно.

Белая мягкая пена карбомидных смол.

Обозначения: *d* — диаметр волокон, зерен, пор; Р —давление газа; Я —пор1

Таблиц; 15. 29. Теплопроводности горных пород, Вт/(м.К) [63]

	$\lambda_{ср}$	
Осадочные породы		
Аргиллит, глинистый сланец	1,3	0,25—3,1
Глина	1,6	0,12-3,1
Доломит	3,2	1,6—6,5
Известняк	2,3	0,64-4,4
Каменная соль	3,6	1,7-5,5
Мел	1,6	0,82-2,2
Песчаник	1,8	0,24-4,4
Торф	0,07	—
Уголь	0,45	0,13-2,2
Ил, глина, песок	0,84	0,61-2,1
Магматические породы		
Базальт	1,3	0,44-3,5
Гранит	2,4	1,1-3,9
Диабаз	2,5	1,7-3,3
Лава	0,49	0,25-0,73
Обсидиан	1,5	1,4—1,6
Туф	2,3	1,3-4,0
Метаморфические породы		
Гнейс	2,0	0,94-4,9
Кварцит	5,3	2,7-7,6
Мрамор	2,6	1,6-4,0
Сланец	2,3	0,65-4,8

список ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — 2-е изд.: Пер. с англ./Под ред. А. А. Померанцева. М: Наука, 1964.

2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

3. Thermal conductivity/Ed. R. P. Tve. Lend.: Acad. Press Inc. 1969. Vol. 1, 2.

4. Ho C. Y., Powell R. W., Liley P. E.//J Phys. Chem. Ref. Data. 1972. Vol. 1. As 2. P. 279—425.

5. Ho C. Y., Powell R. W., Liley P. E.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1974. Vol. 3. Suppl. № 1.

6. Теплопроводность жидкостей и газов: Справочные данные. ГСССД/Н. Б. Варгафтик, Л П. Филиппов, А А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий. М.: Изд-во стандартов. 1978.

7. Теплопроводность твердых тел: Справочник/ А.С. Охотин, Р. П. Боровикова, Т. В. Нечаева, А. С. Пушкарский; Под ред. А. С. Охотипа. М.: Энергоатомиздат, 1984.

8. Childs G. E., Hanley H. J. M.//Cryogenics. 1968. Vol 8, ЛЬ 2. P. 94—97.

9. Гиршфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей: Пер. с англ./Под ред. Е. В. Ступоченко. М.: Пзд-во иностр. лит., 1961.

10. Ферцигер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах: Пер. с англ./Под ред. Д. Н. Зуборева и А. Г. Башкирова. М.: Мир, 1976,

И. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. — 3-е изд.: Пер. с англ./Под ред. Б. И. Соколова. Л.: Химия, 1982.

12. Коган М. Н. Динамика разреженного газа. Кинетическая теория. М.: Наука, 1967.

13. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей..—2-е изд. М.: Наука, 1972.

14. Теплопроводность многоатомных жидкостей и газов: Обзорная информация/Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий. М.: Изд-во стандартов, 1981.

15. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций: Пер. с фр. М.: Мир, 1968.

16. Филиппов Л. П. Исследование теплопроводности жидкостей. М,: Изд-во МГУ, 1970.

17 Займан Дж. Электроны и фонопы. Теория явлений переноса в твердых телах: Пер. с англ./Под ред. В, Л. Бонч-Бруевича. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.

18. Берман Р. Теплопроводность твердых тел: Пер. с англ./Под ред. В. З. Кресина. М.: Мир, 1979,

19. Могилезский Б. М., Чудновский А. Ф. Теплопроводность полупроводников. М.: Наука, 1972.

20. Anderson Л. С.//Amorphous solids. Low-temperature properties/Ed. W. A. Phillips. Berlin: Springer Verlag, 1981. S. 65-78.

21. Ross R. G., Andersson P., Sundqvist B., Biickstrom G.//ReD ProRr. Phvs. 1984 Vol. 47. P. 1347—1402.

22. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат,

23. Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов. — 2-е изд.. М.: Машгиз, 1962.

24. Кожевников И .Г., Новицкий Л. Л. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник — 2-е изд. М.: Машиностроение, 1982.

25. Childs G. B., Ericks L. Y., Powell R W. Thermal conductivity of solids at room temperature and below. A review and compilation of the literaturc/NBS (US) Monogr. 131, 1973,

26 Зиновьев В. В., Коршунов И, Г. Теплопроводность и температуропроводность переходных металлов при высоких температурах. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ. М., НВТ АН СССР. Ч. 1. 1978. № 1. С. 3—121; Ч. 2. 1979. № 4. С. 3—119.

27. Зиновьев В. Е. Кинетические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. М.: Металлургия, 1984.

28. Фегер А., Янош Ш., Петрович П. и др.//Флзика низких температур 1978. Т. 4, № 10. С. 1305—1315.

29.. Chuah D. O. C., Ratnalingam R.//J. Low Temp. Phys. 1974. Vol. 14, № 3/4. P. 257—276.

30. Алиев Н. Н., Волькенштейн Н. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1965. Т 49. вып. 5(11). С. 1450—1452.

31. Cook J. G., van der ДДеег М. P., Laubitz M. J.// Canad. J. Phys. 1972. Vol. 50, № 12. P. 1386-1401

32. Campos Tome M. A.//J. Low Temp. Phys. 1975. Vol. 20, № 5/6. P. 677—689.

33. Andrew J. F., Klemens P. G. Thermal conductivity and Lorenz number of plutonium and plutonium-gallium alloys//Proc 17lh Intern. Thermal Conductivity Conf./Ed. J. G. Hust. N. Y.: Plenum Press. 1983. P 209—218,

34. Ведерников М. В., Кижаев С. А., Петров А. В. и др.//Физика твердого тела. 1975. Т. 17, вып 1. С. 340—342.

35. Амасович Е. С., Пелецкий В. З.//Теплофиз!1ка высоких температур. 1982. Т. 20, № 5. С. 891—896.

36. Справочник металлиста. — 2-е изд./Под ред. Н. С. Ачеркана. М : Машиностроение, 1965. Т. 1.

37. Геллер Ю. А. Инструментальные стали М: Металлургия, 1975.

38. Жданович В. А., Чашкин Ю. Р.//Измерителы1ая техника. 1976. № 3. С. 28—31.

39. Сергеев О. А.//Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1979. Вып. 13. С. 133—137.

40. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник/Под ред Ю. М. Пятина. М.: Машиностроение. 1969.

41. Рогельберг И. Л., Бейлии В. М. Сплавы для термопар: Справочник. М.: Металлургия, 1983.

42. White G. K. Experimental techniques in low-tcmperature physics. — 3d ed. Oxford: Clarendon Press, 1979.

43. Алюминиевые сплавы: Справочное руководство. М.: Металлургия, 1972.

44. Глазунов С Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. М Металлургия, 1974.

45. Смирягин А. П., Смирягина М. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. — 3-е изд. М.: Металлургия, 1974.

46. Справочник металлиста. — 3-е изд./Под ред. А. Г Рахштадта и В. А. Бромстрема М.: Машиностроение, 1976. Т. 2.

47. Cody G. D., Cohen R. W.//Rev. Mod. Phys. 1964. VoL 362, № 1 (part 1). P. 121 — 123.

48. Slack G. A.//Phvs. Rev. 1972. Vol. B6, 10. P. 3791—3800.

49. Whitsett C. R., Nelson D. A., Broerman J. G. et al. //Phys. Rev. 1973. Vol. B7, Кя 10. P. 4625—4640.

50. Slack G. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1973. Vol. 34, № 2. P. 321—335.

51. Slack G. A., Austerman S. B.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42, Л^ 12. P. 4713—4717

52. Jackson H. E., Walker C. T.//Phys. Rev. 1971. \ ol. B3, 4. P. 1428—1439.

53. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1975.

54. Сергеев О. А., Шашков А. Г., Уманский А. С.// Инженерно-физический журнал. 1982. Т. 43, Л^ 6. С. 960-970.

55. Шадричев Е. В., Смирнов И. А.//Приборы и техника эксперимента. 1968. Л» 5. С. 21» 219.

56. Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю. Теплофизи-

ческие свойства неметаллических материалов. (Карбиды): Справочная книга. Л.: Энергия, 1977.
57. Литовский Е. Я., Пучкелевич Н. А. Теплофизиче' ские свойства огнеупоров: Справочник. М.: Металлургия, 1982.
58. Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (Окислы): Справочная книга. Л.: Энергия, 1973.
59. Fink J. K, Chazanov M. G., Leibovitz L.//J. Nucl. Mater. 1981. Vol. 102. J. 17—25.
60. Тепловая изоляция: Справочник строителя. — 4-е изд./Т. Ф. Кузнецов, В. И. Вельский, В. П. Горбачев и др.; Под ред. Г. Ф. Кузнецова. М.: Стройиздат, 1985.
61. Харламов А. Г. Теплопроводность высокотемпературных теплоизоляторов. М.: Атомиздат, 1980.
62. Powell R. L., Childs G. E.//American Institute of Physics Handbook. —3d ed. N. Y.: McGraw-Hill, 1972. Ch. 4g.
63. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика. — 2-е изд./Под ред. Н. Б. Дортман. М.: Недра, 1984.

ГЛАВА 16

ВЯЗКОСТЬ

А. в. Елецкий

16.1. ВВЕДЕНИЕ

Вязкость текучих тел г\ху определяется соотношением Ньютона

$$f:c = -rUyyV_{„} \qquad (16.1)$$

связывающим силу внутреннего трения Fx, которая действует на единичную площадку в направлении, противоположном градиенту скорости течения вязкого вещества (газа, жидкости), с градиентом скорости Vt/j,. Если рассматриваемый объем, заполненный текучим веществом, не имеет выделенных направлений, которые могут быть обусловлены либо наличием внешних полей, либо преимущественной ориентацией частиц вещества, все компоненты тензора вязкости равны друг другу и вязкость является скаляром. Именно такой случай мы и будем рассматривать в дальнейшем.

Иногда коэффициент т] называют динамической вязкостью, отличая его от коэффициента v=Ti/p(p — плотность вещества), называемого кинематической вязкостью. Единица динамической вязкости в СИ—Па-с^Н-с/м2 = =кг'/(м-с), кинематической вязкости — м^/с.

16.2. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ

В широком диапазоне изменения давления газа вязкость газа определяется парными соударениями составляющих его частиц. Нижняя граница этого диапазона определяется условием, согласно которому характерная длина пробега частиц газа много меньше размеров рассматриваемой емкости с газом. В случае, если размер емкости ~10 см, указанная граница соответствует давлению ~1 Па (10-2 ИИ р^ (-т) Верхняя граница определяется условием идеальности газа, согласно которому длина свободного пробега частиц много больше среднего расстояния между ними п-'р. Указанное условие, при выполнении которого роль тройных и других множественных столкновительных процессов по сравнению с процессами парных соударений несущественна, может быть выражено в виде

$$n\ C\ a\text{-}з^{\prime\prime} \qquad (16.2)$$

(а —сечение рассеяния частиц). Это условие ограничивает давление значением порядка нескольких десятков мегапаскалей (нескольких сотен атмосфер). Кроме того, условие идеальности газа зависит от температуры и может существенно нарушаться при приближении к тройной точке.

Согласно элементарной кинетической теории газов выражение для вязкости газа, моделируемого шариками с не зависящим от скорости сеченнем соударения, имеет

где т—масса частицы газа; <t;>«'1 $2kTlm$—средняя тепловая скорость; а — сечение рассеяния. В реальной ситуации сечение рассеяния атомов и молекул зависит от скорости (обычно убывает с ростом скорости). В этом случае выражение для вязкости, определяемое на основании решения кинетического уравнения Больцмана, имеет значительно более сложный вид, тем не менее из этого выражения, так же как и из элементарной теории (16.2), следует, что вязкость в широком диапазоне изменения давления практически от давления не зависит* и возрастает с температурой более резко, чем по закону

В табл. 16.1, 16.2 приведены значения вязкости газообразных веществ. Эти значения получены в результате усреднения большого количества экспериментальных данных и соответствуют условиям, когда изменение давления газа не приводит к изменению вязкости в пределах погрешности эксперимента (0,1—17о). Такая ситуация имеет место при давлениях ниже атмосферного. Характер зависимости вязкости от давления виден из табл. 16.3, 16.4, где приведены значения вязкости азота и водорода при различных температуре и давлении [2]. Погрешность данных, приведенных в табл. 16.1—16.4, не превышает нескольких процентов.

Вязкость смеси двух газов может немонотонным образом зависеть от ее парциального состава. Это следует как из прямых экспериментов, так и из результатов кинетической теории [3]. Немонотонность проявляется, в частности, в зависимости вязкости частично диссоциированных молекулярных газов от температуры и давления. Изменение температуры и давления газа вызывает изменение степени его диссоциации, т. е. парциального состава, а это в свою очередь сказывается на значении вязкости. В табл. 16.5—16.10 приведены значения вязкости наиболее широко распространенных молекулярных газов при различных давлении и температуре в условиях, когда газ является частично диссоциированным. В табл. 16.11—16.14 приведены значения вязкости некоторых бинарных газовых смесей при различных температуре и парциальном составе. Погрешность приведенных данных— порядка 1%. В табл. 16.15 представлены значения вязкости частично диссоциированного воздуха.

* Зависимость вязкости от давления возникает при наличии в газе процессов ассоциации, изменяющих число Частиц в системе.

Таблица 16.1. Вязкость газов при атмосферном давлении и различной температуре, Ю"' Па-с (погрешность данных 1—10%) [1, 2, 4]

Г. к	He	Ne	Ar	Кг	Xe	н.	D.	N,	о.		CI,
60	7,06	9,63	5,34	—	—	2,91	3,86			i	
80	8,41	12,1	6,83	—	—	3,60	4,88	5,59	6,27		
100	9,63	14,4	8,34	9,29	—	4,21	5,79	6,87	7,68	8,56	
150	12,3	19,4	12,3	13,4	12,2	5,57	7,77	10,0	11,3	12,9	
200	15,0	23,9	16,0	17,6	15,8	6,78	9,55	12,9	14,6	16.8	
250	17,5	28,0	19,5	21,6	19,6	7,90	11,2	15,5	17,8	20,3	
300	19,9	31,7	22,7	25,5	23,3	8,94	12,7	17,9	20,7	23,6	13,7
400	24,3	38,4	28,5	32,7	30,4	10,9	15,5	22,1	25,9	29,5	18,0
500	28,3	44,5	33,6	39,1	36,8	12,7	18,0	25,9	30,5	34,8	22,1
600	32,0	50,0	38,3	45,0	42,9	14,5	—	29,3	34,7	—	25,8
800	38,8	60,0	46,4	55,4	53,7	17,7		35,2	42,1		32,6
1000	45,0	68,9	53,5	64,5	63,2	20,7		40,4	48,5		
1500	58,6		68,4	83,6	83,3	27,6			61,9		
2000	70,7		80,7			33,6			73,1		
2200	74,2	—	85,1								

Продолжение табл. 16. t

Г, к	CO	co.	H,S	COS	cs.	HON	QN,	SiH.	Воздух	PH.	CCl4
60											
80	5,40										
100	6,70	—	—	—	—	—	—	—	7,11	—	—
150	9 84								10,3		
200	12,7	1^2	Z	Z	Z	Z	Z	Z	13,2	Z	Z
250	15,4	12,6							16,0		
300	17,8	15,0	13,0	12,5	10,1	7,58	10,2	11,7	18,5	11,8	9,9
400	22,1	19,5	17,3	16,6	13,6	10,8	13,7	15,3	23,0	15,6	13,0
500	25,9	23,6	—	20,4	16,9	13,9		18,9	27,0	19,1	16,0
600	29,4	33,9	—	—	20,2		—		30,6		19,0
800	35,4	39,5	—	—	—				37,0		
1000	40,6	—	—	—	—		—		42,4		
1500	51,6	—	-	—	—	—	—	—	53	—	
2000									63		
2200	-	-	-	-	-	-	-	-	67	-	-

Продолжение табл. 16.1

Т, к	BF3	Ts	NH3	BF,	HCl	HI	H,S	NO	NO,	N,0	SO,	H,o
60												
cO												
100												
lau								in c;				
200	Z	Z	6,89	12,1	Z	Z	Z	13,6	Z	10,0	8,62	Z
250			8,53	14,6	12,1	15,9		16,6		12,6	10,8	
300	15,5		10,3	17,1	14,6	19,0	12,6	19,3	13,0	15,0	13,0	9,13
400	20,3	18,6	13,9	21,7	19,6	25,1	16,9	24,1	21,3	19,5	17,3	13,2
500	25,1	23,0	17,6	26,1	24,3	31,0	20,8	28,4		23,6	21,3	17,3
600	29,9	27,2	21,4	30,2	28,8	36,7		32,3		27,3	25,1	21,3
800	39,2	—	28,8	—	—			39,0		34,1	32,1	29,5
1000	—	—	35,9	—	—		—	44,9	—	40,0	38,4	37,6
1500	—	—	—	—	—	—	—	57,3	—	52,5	—	
Ш)												
2200												

Таблица 16.2. Вязкость газообразных углеводородов и их производных при атмосферном давлении, Ю"» Па-с [1, 2]

	Температура Т, К							
	200	250	300	400	500	600	800	1000
Ацетон CзH6O		6,78	7,77	10,1	12,8	15,5	—	—
Ацетилен C2H2	—	—	10,3	13,5	16,4	19,1	—	—
Бензол CjHe	—	—	7,65	10,2	12,7	15,1	—	—
Бромметан CHзBr		13,2	15,8	20,2	24,3	—	—	—
изо-Бутан изо-C^Hi^			7,60	10,0	12,3	14,0	17,5	—
к-Бутан K-C4H10			7,57	9,96	12,3	14,5	18,2	—
Тетрахуюрметан CCI4			9,97	13,2	16,1	18,8	23,7	—
Тетрафторметан CF4	‹	14,9	17,5	22,1	26,2	—	—	—
Пентафторхлорэтан CaFjCl			12,8	16,5	20,0	—	—	—
Трифторхлорметан CF3Cl		12,4	14,5	18,9	23,4		—	—
Дифтордихлорметан CF2Cl2	—	10,6	12,6	16,4	19,8	—	—	—
Дихлорфторметан CHCl^F			11,6	15,3	18,8	—	—	—
Дихлортетрафторэтан CjClIaFy		10,0	11,6	15,0	18,4	—	—	—
	6,43	7,96	9,45	12,2	14,8	17,2	21,4	25,1
Этанол^CrHйOH			9,0	11,8	14,1	16,9	—	—
Этилен CrЩ	7,1	8,8	10,4	13,5	16,3	18,8	23,4	27,5
Диэтилэфир QHi„0		6,3	7,6	10,1	12,5	14,7	—	—
к-Гептан H-QHjg			6,1	7,9	9,8	11,6	—	—
w-Гексан к-CбH14			6,7	8,7	10,8	12,8	16,5	19,6
Метан CH^	7,76	9,53	11,2	14,2	17,0	19,4	23,8	27,6
Метанол CHяOH		8,3	9,9	13,1	16,5	19,8	—	—
Хлорметан CH3Cl		9,29	11,0	14,5	17,9	21,3	—	—
к-Октан K-CgHie				7,40	9,2	10,9	—	—
изо-Пентан мзо-CбH^		—		9,60	12,0	14,3	16,8	—
я-Пентан H-CSHIZ				9,23	11,4	13,4	16,8	—
и-Пропан к-CзHв			8,25	10,8	13,3	15,6	—	—
Пропилен CзHe		7,28	8,78	11,5	14,1	16,5	—	—
Пропан CgHg		7,1	8,3	9,48	11,7	5,2	17,1	—
Трихлорфторметан CCI3F		9,42	11,0	14,3	17,8	—	—	—
Трихлортрифторэтан C2CI3F3	—	9.13	10,4	12,5	—	—	—	—
Трифторметан CHF3	—	12,4	14,9	19,6	23,8	—	—	—
Бромтрифторметан CBrF3	—		15,0	19,8	—	—	—	—
ызо-Пропанол изо-CзH^O					13,1			
и-Пропанол к-CзHeO	-	—	—	10,6	13,2	—	—	—

Таблица 16.3. Вязкость газообразного азота при различных температуре и давлении, Ю"® Па-с [3]

Т. к	Давление. Ю» Па						
		10	50	100	150	200	400
80	5,52						
100	6,88						
120	8,21	8,68					
140	9,45						
160	10,6	11,0	13,4	22,1	31,3	38,4	59,0
180	11,8	12,1	13,8	18,3	24,5	30,4	49,0
200	12,9	13,1	14,5	17,5	21,7	26,2	42,3
250	15,5	15,7	16,6	18,2	20,4	22,7	33,5
300	17,8	18,0	18,7	19,8	21,3	22,9	30,4
400	22,0	22,2	22,7	23,4	24,2	25,2	29,6
500	25,8	25,9	26,3	26,8	27,4	28,1	31,1
600	29,1	29,2	29,5	29,9	30,4	30,9	33,2
700	32,1	32,2	32,4	32,8	33,2	33,6	35,5
800	34,9	35,0	35,2	35,5	35,8	36,2	37,8
900	37,5	37,6	37,8	38,1	38,4	38,6	40,0
1000	40,0	40,0	40,2	40,5	40,7	41,0	41,6
1100	42,3	42,4	42,5	42.8	43,0	43,2	44,3
1200	44,5	44,6	44,7	44.9	45,1	45,4	46,3
1300	46,6	46,7	46,8	47,0	47,2	47,4	48,2

Таблица 16.4. Вязкость газообразного водорода при различных давлении и температуре, Ю"® Па-с [3]

	Давление, Ма					
30	1.6					
50	2.49	2,54	**2,80**	4,20	6,25	17,4
100	4,21	4,23	4,24	4,42	5,0	9,95
200	6,81	**6,82**	6,85	6,91	7,06	9.13
300	8,96	8,96	8,98	9,02	9,10	10,3
500	12,6	**12,6**	**12,8**	12,7	12,7	13.3
750	**16,6**	**16,6**	**16,6**	**16,6**	**16,6**	17,0
1000	**20,1**	20,1	20,1	**20,2**	**20,2**	20.4

Таблица 16.5. Вязкость частично диссоциированного водорода, 10-" Па-с [3]

Т, 10=ʻк	Давление, Па						
	102	10»	*10«*	10»	*10»*	10'	2-10'
1,8	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6
2,0	32,0	31,9	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8
2,2	34,8	24,4	24,2	24,2	24,2	24,2	**24,2**
2,4	37,3	37,2	36,8	36,6	36,6	36,6	**36,6**
2,6	37,7	40,0	39,6	39,2	39,0	39,0	39,0
2,8	34,2	37,6	42,!	42,3	41,8	41,5	41,5
3,0	36,8	41,3	44,9	44,7	44,2	44,0	43,9
3.2	38 1	40,7	46,4	47,6	46,9	46,5	46,4
3,4	39,6	41,1	46,4	50,!	49,7	49,1	50,0
3,6	41,7	42,3	46,0	51,9	52,4	51,7	51,5
3,8	43,5	43,8	46,0	52,7	55,1	54,4	54,1
4,0	45,3	45,4	46,7	52,7	57,5	57,1	56,8
4.2	47,1	47,2	47,9	52,6	59,3	59,8	59,5
4,4	48,9	48,9	49,4	52,7	60,5	62,5	62,2
4,6	50,6	50,6	50,9	53,2	61,1	65,0	64,9
4,8	52,4	52,4	52,6	54,1	61,4	67,3	67,4
5,0	54,1	54,1	54,3	55,3	61,5		69,8
5,2	55,9	55,9	56,0	56,7	61,8	70^9	72,0
5,4	57,7	57,7	57,7	58,3	62,3	72,1	73,9
5.6	59,5	59,5	59,6	59,9	63,1	74,0	75,5
5,8	61,4	61,4	61,4	61,7	64,1	73,8	76,8
6,0	63,3	63,3	63,3	63,5	65,4	74,5	77,4

Таблица 16.6. Вязкость частично диссоциированного водяного пара, Ю"" Па с [3]

т. ш» к	Давление. Па							
	0,1	0,4	1.0	o.O	20	40	60	100
1,8	**6,12**	**6,12**	**6,12**	**6,12**	**6,12**	**6,12**	**6,12**	**6,12**
2,0	**6,57**	**6,58**	**6,59**	**6,59**	**6,60**	**6,60**	**6,60**	**6,60**
2,2	**6,98**	**7,02**	**7,03**	**7,04**	**7,05**	**7,06**	**7,06**	**7,06**
2,4	**7,3!**	**7,39**	**7,42**	**7,46**	**7,49**	**7,49**	**7,50**	**7,50**
2.6	**7,52**	**7,67**	**7,75**	**7,84**	**7,89**	**7,90**	**7,91**	**7,92**
2,8	**7,54**	**7,84**	**7,98**	**8,15**	**8,24**	**8,28**	**8,29**	**8,31**
3,0	**7,56**	**7,90**	**8,!0**	**8,38**	**8,54**	**8,60**	**8,63**	**8,65**
3,2	**7,63**	**7,78**	**8,14**	**8,52**	**8,77**	**8,86**	**8,91**	**8,96**
3,4	**7,95**	**7,96**	**8,16**	**8,59**	**8,93**	**9,06**	**9,13**	**9,21**
3.6	**8,44**	**8,22**	**8,25**	**8,63**	**9,03**	**9,20**	**9,30**	**9,41**
3,8	**9,03**	**8,67**	**8,51**	**8,68**	**9,08**	**9,29**	**9,41**	**9,55**
4,0	**9,53**	**9,22**	**8,95**	**8,82**	**9,14**	**9,36**	**9,49**	**9,65**
4,2	**9,97**	**9,76**	**9,49**	**9,09**	**9,22**	**9,42**	**9,55**	**9,73**
4,4	**10,3**	**10,2**	**10,0**	**9,50**	**9,39**	**9,52**	**9,63**	**9,80**
4.6	**10,8**	**10,7**	**10,6**	**9,99**	**9,65**	**9,68**	**9,75**	**9,89**
4,8	**11,2**	**11,1**	**11,0**	**10,6**	**10,0**	**9,93**	**9,94**	**10,0**
5,0	**11,6**	**!!,6**	**11,4**	**11,0**	**10,4**	**10,2**	**10,2**	**10,2**
5,2	**!!,9**	**11,9**	**11,8**	**11,6**	**10,9**	**10,7**	**10,6**	**10,5**
5,4	**12,3**	**12,2**	**12,2**	**12,0**	**11,5**	**11,2**	**11,0**	**10,8**
5,6	**12,6**	**12,6**	**12,6**	**12,4**	**12,0**	**11,6**	**11,4**	**11,2**
5.8	**13,0**	**13,0**	**13,0**	**12,8**	**12,5**	**12,2**	**12,0**	**11,7**
6,0	**13,4**	**13,4**	**13,4**	**13,2**	**13,0**	**12,6**	**12,4**	**12,2**

Таблица 16.7. Вязкость частично диссоциированной двуокиси углерода COg, 10"® Па-с [3]

Т. 10» к	ДавлеШ1с, Па		
	10»	№	10'
1,6	56,4	56,4	56,4
1,8	61,5	61,4	61,4
2,0	66,7	66,3	66,2
2,2	74,3	71,2	70,9
2,4	79,0	76,2	75,5
2,6	86,6	81,7	80,2
2,8	94,2	87,9	84,9
3,0	101	94,8	89,9
3,2	106	102	95,2
3,4	111	109	101
3,6	116	116	107
3,8	122	122	113
4,0	127	128	120

Таблица 16. 8. Вязкость частично диссоциированного азота, 10-« Па-с [31

Т, 10" к	Да ВЛкние. Па					
	102	10»	100	10»	10»	10'
3,6	**106**	**106**	**106**	**106**	**106**	**106**
3,8	**111**	**111**	**111**	**111**	**111**	**111**
4,0	**116**	**115**	**115**	**115**	**115**	**115**
4,2	**120**	**120**	**120**	**120**	**120**	**120**
4,4	**125**	**125**	**124**	**124**	**124**	**124**
4,6	**130**	**129**	**129**	**129**	**120.**	**129**
4,8	**136**	**134**	**134**	**134**		**134**
5,0	**142**	**139**	**138**	**138**	**138**	**138**
5,2	**149**	**144**	**143**	**143**	**из'**	**143**
5,4	**155**	**149**	**147**	**147**	**147**	**147**
5,6	**162**	**155**	**152**	**152**	**152**	**152**
5,8	**167**	**162**	**157**	**156**	**156**	**156**
6,0	**172**	**168**	**162**	**161**	**161**	**. 161**

Таблица 16.9. Вязкость частично диссоциированного кислорода, 10-6 Па-с [3]

Т. 10= к	Давление, Па					
	102	10»	10"	10»	10» •	10'
2,0	**73,7**	**73,6**	**73,5**	**73,5**	**73,5**	**73,5**
2,2	**79,1**	**78,6**	**78,4**	**78,3**	**78,3**	**78,3**
2,4	**85,9**	**84,0**	**83,3**	**83,0**	**82,9**	**82,9**
2,6	**93,9**	**90,6**	**88,6**	**87,8**	**87-, 6**	**•87,5**
2,8	**100**	**98,6**	**94,8**	**92,0**	**92,2**	**•92,0**
3,0	**104**	**106**	**102**	**98,6**	**97,0**	**96,5**
3,2	**108**	**111**	**111**	**105**	**102**	**101**
3,4	**112**	**114**	**118**	**И3**	**108**	**106**
3,6	**117**	**118**	**122**	**121**	**115**	**111**
3,8	**122**	**123**	**126**	**129**	**122 ,**	**116**
4,0	**127**	**127**	**129**		**130 ,**	**,133**
4,2	**132**	**132**	**133**	**139**	**138**	
4,4	**139**	**137**	**138**	**142**	**146**	**133**
4,6	**142**	**142**	**142**	**И5**	**152 1**	**145**
4,8	**146**	**146**	**147**	**149**	**156 ,**	**153**

Продолжение табл. 16.9

m. 10' к	Давление, Па					
	102	10'	10'	10=	10›	10'
5,0	151	161	151	153	160	lei
5,2	156	156	156	157	163	168
5,4	160	160	160	161	166	174
5,6	165	165	165	166	170	180
5,8	170	170	170	170	173	184
6,0	174	174	174	174	177	188

Таблица 16. 10. Вязкость частично диссоциированиого фтора, 10-6 Па-с [3]

Г, 10" к	Давление. Па		
	10'	10^	10'
1,0	58,7	57,8	57,5
1,2	71,6	67,4	65,8
1,4	85,7	79,6	75,0
1,6	95,5	92,1	85,5
1,8	104	102	95,6
2,0	114	114	109
2,2	122	127	120
2,4	130	130	128
2,6	137	137	137
2,8	143	143	143
3,0	152	152	152
4,0	185	185	185
5,0	217	217	217
6,0	247	247	247

16.11. Вязкость смеси Ar — He при атмосферном давлении, различных значениях температуры и молярной доли Ar, 10-6 Па-с [1]

Молярная доля *At*	Температура, К								
	72,0	90,2	192,5	229.5	293	373	456	473	523
0	7,98	9,12	14,5	16,4	19,7	23,2	16,9	27,2	29,0
0,05	8,23	9,40	15,4	17,6	20,6	23,8	28,3	27,8	29,8
0,10	8,34	9,60	16,0	17,9	21,3	24,4	29,2	28,4	30,6
0,15	8,37	9,70	16,4	18,4	21,8	25,0	29,9	29,0	31,4
0,20	8,37	9,74	16,6	18,8	22,2	25,6	30,5	29,5	32,1
0,25	8,32	9,70	16,8	19,0	22,5	26,0	31,0	30,0	32,7
0,30	8,24	9,60	16,2	19,2	22,7	26,4	31,3	31,4	33,2
0,35	8,13	9,47	16,9	19,2	22,8	26,8	31,6	31,8	33,6
0,40	8,00	9,32	16,8	19,1	22,9	27,0	31,9	32,2	34,0
0,45	7,85	9,17	16,7	19,0	22,9	27,2	32,1	31,4	34,3
0,50	7,70	9,03	16,6	18,9	23,0	27,4	32,2	31,7	34,5
0,55	7,54	8,90	16,4	18,8	23,0	27,5	32,4	31,9	34,7
0,60	7,40	8,76	16,3	18,8	22,9	27,5	32,4	32,0	34,8
0,65	7,24	8,63	16,2	18,7	22,9	27,5	32,5	3^,1	34,9
0,70	7,09	8,49	16,1	18,6	22,8	27,5	32,5	32,2	35,0
0,75	6,95	8,35	16,0	18,5	22,7	27,4	32,5	32,2	35,0
0,80	6,82	8,21	15,9	18,3	22,6	27,3	32,5	32,2	34,9
0,85	6,70	8,07	15,8	18,2	22,5	27,2	32,4	32,2	34,8
0,90	6,57	7,93	15,7	18,0	22,4	27,1	32,4	32,2	34,8
0,95	6,50	7,80	15,6	17,9	22,3	27,0	32,4	32,1	34,6
1,00	6,35	7,68	15,5	17,7	22.1	26,8	32,3	32,1	34,5

Таблица 16.12. Вязкость смеси Ar — Ne при атмосферном давлении, различных значениях температуры и молярной доли Ar, 10-6 Па-с [1]

Молярная доля Ar	Температура, К							
	72.3	90.3	193.4	229	293	373	473	023
0	11,7	13,5	23,5	26,7	30,9	36.2	42.2	45,0
0,05	11,4	13,1	23,0	26,2	30,4	35,6	41.6	44.3
0,10	11,0	12,8	22,4	25,6	29,8	35,1	41.0	43.6
0,15	10,6	12,4	21,9	25,1	29,3	34,4	40.3	43.0
0,20	10,3	12,0	21,4	24,6		33,9	39.7	42.4
0,25	10.0	11,7	20,9	24.1	28^3	33,4	39.1	41.7
0,30	9,66	11,3	20,4	23,6	27,8	32,8	38,6	41.1
0,35	9,35	11,0	20,0	23.2	27,3	32.3	38,0	40,6

Продолжение табл. 16. 12

Молярная доля Аг	Температура, К							
	72.3	90,3	193,4	229	293	373	473	523
0,40	9,06	10,7	19,5	22,7	26,8	31,8	37,4	40,0
0,45	8,80	10,4	19,1	22,3	26,4	31,3	36,9	39,5
0,50	8,53	10,1	18,7	21,8	25,9	30,8	36,4	38,9
0,55	8,28	9,83	18,3	21,4	25,5	30,4	35,9	38,4
0,60	7,03	9,57	17,9	21,0	25,1	30,0	35,4	37,9
0,65	7,80	9,32	17,3	20,6	24,7	29,6	34,9	37,4
0,70	7,56	9,10	17,1	20,2	24,4	29,2	34,5	37,0
0,75	7,34	8,87	16,8	19,8	23,9	28,8	34,1	36,6
0,80	7,12	8,65	16,5	19,4	23,6	28,5	33,7	36,2
0,85	6,92	8,44	16,2	19,0	23,2	28,1	33,3	35,-8
0,90	6,74	8,21	15,9	18,7	22,9	27,7	32,9	35,4
0,95	6,56	8,00	15,6	18,3	22,5	27,3	32,6	35,0
1,00	6,38	7,75	15,3	18,0	22,1	26,9	32,2	34,6

Таблица 16.13. Вязкость смеси Аг — Н, при различной молярной доли Аг, 10-е Па-с [1]

молярная доля	Температура, К			
	293	373	473	523
0,00	8,75	10,3	12,1	13,0
0,05	9,08	12,8	15,3	16,4
0,10	13,0	15,0	18,1	19,5
0,15	14,6	17,2	20,5	22,1
0,20	16,0	18,9	22,5	24,2
0,25	17,0	20,3	24,0	25,8
0,30	17,9	21,5	25,4	27,2
0,35	18,6	22,4	26,4	28,4
0,40	19,2	23,2	27,4	29,4
0,45	19,7	23,9	28,2	30,2
0,50	20,2	24,5	28,9	30,9
0,55	20,4	24,9	29,4	31,6
0,60	20,9	25,3	29,9	32,2
0,65	21,8	25,6	30,3	32,7
0,70	21,4	25,9	30,7	33,1
0,75	21,6	26,2	30,9	33,4
0,80	21,7	26,3	31,2	33,7
0,85	21,8	26,5	31,5	33,9
0,90	22,0	26,6	31,7	34,2
0,95	22,1	26,8	31,9	34,3
1,00	22,1	26,8	32,1	34,5

Таблица 16.14. Вязкость смеси CO_2 — Na при атмосфнном давлении, различных температуре и молярной доле CO_2, Ю"» Па-с [1]

Молярная доля CO_2	Температура, К			
	300	400	500	550
0	8,9	10,8	12,6	13,4
0,Й5	10,9	13,4	15,4	16,9
0,10	12,1	15,0	17,4	18,7
0,15	12,9	16,1	19,0	20,1
0,20	13,6	16,9	20,0	21,4
0,25	14,0	17,6	20,8	21,6
0,30	14,3	18,1	21,5	23,4
0,35	14,6	18,5	22,0	24,0

Продолжение табл. 16.14

Молярная доля CO_2	Температура, К			
	300	400	500	550
0,40	14,8	18,8	22,4	24,4
0,45	14,9	19,0	22,7	24,7
0,50	15,0	19,2	22,9	24,9
0,55	15,0	19,3	23,1	25,1
0,60	15,1	19,4	23,3	25,2
0,65	15,1	19,4	23,4	25,3
0,70	15,1	19,5	23,5	25,4
0,75	15,0	19,5	23,6	25,4
0,80	15,0	19,5	23,6	25,4
0,85	15,0	19,5	23,6	25,5
0,90	15,0	19,5	23,6	25,5
0,95	15,0	19,5	23,6	25,5
1,00	14,9	19,4	23.5	25,6

Таблица 16.15. Вязкость частично диссоциированного воздуха, 10-е Па с [3]

Т. 10' К	Давление, 10» Па			
	0,001	1	10	100
1,5	55,7	55,7	55,7	55,7
1,6	58,4	58,4	58,4	**58,4**
1,7	61,1	61,1	61,1	**61,1**
1,8	63,7	63,7	63,7	63,7
1,9	66,3	66,3	66,3	66,3
2,0	69,0	68,9	68,9	68,9
2,1	71,7	71,5	71,5	71,5
2,2	74,5	74,0	74,0	74,0
2,3	77,4	76,6	76,6	76,6
2,4	80,6	79,2	79,2	79,2
2,5	83,9	81,8	81,7	81,7
2,6	87,4	84,4	84,3	84,3
2,7	90,7	87,1	86,9	86,9
2,8	94,0	89,8	89,6	89,5
2,9	97,0	92,6	92,2	92,1
3,0	99,9	95,5	94,9	94,7
3,1	103	98,4	97,6	**97,3**
3,2	106	101	100	**99,9**
3,3	108	104	103	103

Продолжение табл. 16. 15

т. 10^ к	Давление, Ю^ Па			
	0,001		10	100
3,4	111	108	106	105
3,5	114	111	109	108
3,6	116	114	112	111
3,7	119	117	115	113
3,8	122	120	118	116
3,9	124	123	121	119
4,0	127	126	124	122
4,1	130	" 129	127	124
4,2	132	132	130	127
4,3	135	134	133	130
4,4	138	137	136	133
4,5	140	140	138	136
4,6	143	142	141	139
4,7	145	145	144	142
4,8	147	147	147	144
4,9	149	150	149	147
5,0	151	152	152	150
5,1	153	155	154	153
5,2	155	158	157	155
5,3	156	160	160	158
5,4	158	162	162	161
5,5	160	165	165	163
5,6	161	167	167	166
5,7	163	170	170	168
5,8	165	172	172	171
5,9	167	175	174	173
6.0	169	177	177	176

16.3. ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Основным источником информации о вязкости жидкостей служит эксперимент. При этом в силу чувствительности измерений к качеству обработки поверхности камеры, в которой проводится экспериментальное исследование вязкости, погрешность при измерении вязкости в жидкости несколько превышает погрешность измерения вязкости газов. В табл. 16.16—16.21 представлены значения вязкости сжиженных газов и некоторых жидкостей, жидких органических соединений, жидких металлов, сплавов, расплавов солей и оснований при различной температуре.

Таблица 16.16. Вязкость сжиженных газов и некоторых жидкостей, 10-з Па-с, при различной температуре. **К** (давление соответствует условиям насыщения) [1, 2, 3]

Т, К		Г. К		*т.* К	^1	1	
	He	31	0,0058	115	0,12	82,8	0,16
		32	0,0048	120	0,11	90 Л	0,15
1,28	0,00015	33	0,0038	125	0,10	99,6	0,12
1,30	0,00016			130	0,096	112	0,10
1,34	0,00018		Ne	135	0,088	130	0,066
1,59	0,00023			140	0,078		H,S
1,76	0,00036	25	0,15	145	0,066	191	0,52
1,91	0,00068	26	0,14	154	0,026	193	0,51
2,00	0,00096	27	0,13		NH,	198	0,49
2,09	0,0012		0,12	**240**	**0,28**	201	0,47
2,11	0,0013	29	0,10	**250**	**0,25**	206	0,45
2,14	0,0016	30	0,098	**260**	**0,22**	210	0,44
2,16	0,0018	31	0,091	**270**	**0,19**		HCl
2,18	0,0023	32	0,084	**280**	**0,17**	161	0,57
2,32	0,0020	33	0,078	**290**	**0,15**	167	0,55
2,64	0,0024	34	0,072	**300**	**0,14**	172	0,51
2,93	0,0024	35	0,067	**310**	**0,12**	177	0,49
3,74	0,0028	36	0,062	**320**	**0,11**	183	0,47
3,81	0,0029	37	0,056	**330**	**0,10**	188	0,46
4,02	0,0030	38	0,052	340	0,097		•
		39	0,047	350	0,088	69,2	0,41
	Ar	40	0,043	360	**0,080**	73,2	0,35
		41	0,039	370	**0,070**	75,3	0,33
85	0,28	42	0,034	380	**0,061**	78,2	
90	0,94	43	0,031	390	**0,051**	80,9	0^28
95	0,21	44	**0,027**	400	**0,040**	83,2	0,26
100	0,18			405	**0,025**		CIO^
105	0,16		N.		H,0	255	0,12
ПО	0,15			273	1,75	260	0,12
115	0,13	**60**	**0,36**	280	1,42	265	0,11
120	0,12	**65**	**0,27**	300	0,82	270	0,10
125	0,11	**70**	**0,22**	320	0,56	275	0,096
130	0,10	**75**	**0,18**	340	0,41	280	0,091
135	0,089	**80**	**0,15**	360	0,32	285	**0,086**
140	0,075	**85**	**0,13**	380	0,26	**290**	**0,079**
145	0,060	**90**	**0,11**	400	0,22	**295**	**0,070**
150	0,045	95	0,097	420	0,18	**300**	**0,060**
151	0,028	100	0,087	440	0,16	**304**	**0,032**
		105	0,078	460	0,14	**310**	**0,022**
	H.	ПО	0,071	480	0,13	**330**	**0,020**
		115	0,060	500	0,12	**350**	**0,020**
14	0,026	120	0,048	520	0,11	**400**	**0,021**
15	0,022	125	0,032	540	0,10	**500**	**0,025**
16	0,020	126	0,019	560	0,094	**600**	**0,028**
17	0,018			580	0,086		HI
18	0,016		O2	600	0,079	**223**	**1,42**
19	0,015	55	0,80	620	0,071	**227**	**1,38**
20	0,014	60	0,59	647	0.042	**232**	**1,34**
21	0,013	65	0,46		Воздух	**236**	**1,30**
22	0,012	70	0,37	90,1	0,13		HBr
23	0,011	75	0,30	107,2	0,094	187	0,87
24	0,010	80	0,26		0,090	191	0,85
25	0,0096	85	0,22	125,1	0,082	194	0,84
26	0,0088	90	0,20		CO	199	0,82
27	0,0082	95	0,17	**73,2**	**0,22**		
28	0,0076	100	0,16	**75,2**	**0,20**		
29	0,0070	105	0,14	**77,8**	**0,19**		
30	0,0064	ПО	0,13				

Таблица 16.17. Вязкость жидких органических соединений, Ю^з Па-с, при различной температуре, К (давление соответствует условиям насыщения [1—3]

Т.	1	Г	' 1	Т		Т	ч
			C3He		CH4	320	0,67
						330	0,60
285	0,74	88,7	1,45	90	0,20	340	0,53
300	0,58	89,8	1,27	100	0,15	350	0,48
320	0,45	90,1	1,24	ПО	0,12	360	0,43
340	0,36	94,3	0,78	120	0,098	370	0,39
360	0,30	98,0	0,54	130	0,082	380	0,36
380	0,25	103	0,36	140	0,071	390	0,32
400	0,20	107	0,27	150	0,063	400	0,29
420	0,17	111	0,22	160	0,054	420	0,25
440	0,15	119	0,16	170	0,045	440	0,22
460	0,13			180	0,035	460	0,19
480	0,11		C^He	190	0,021	480	0,17
500	0,098					500	0,16
520	0,084	100			C3He		
540	0,059	ПО	0,64				
		120	0,48				
		130	0,38				
		140	0,31	80	19,2		
		150	0,26	100	3,8		
	C4H10	160	0,23	120	1,5	300	1,33
		170	0,20	140	0,82	310	1,16
		180	0,18	160	0,54	320	1,01
190	0,75	190	0,16	180	0,39	330	
200	0,61	200	0,14	200	0,30	340	0,'77
210	0,50	210	0,12	220	0,24	350	0,68
220	0,42	220	0.11	240	0,19	360	0,61
230	0,36	230	0,099	260	0,16	370	0,54
240	0,31	240	0,089	280	0,13	380	0,49
250	0,27	250	0,079	300	0,11	390	0,44
260	0,24	260	0,071	320	0,083	400	0,41
270	0,21	270	0,052	340	0,062	420	0,34
280	0,19	280	0,054	360	0,041	440	0,29
290	0,18	290	0,046	369	0,021	460	0,25
300	0,16	300	0,036				
320	0,14	305	0,022				
340	0,12						
360	0,095				CHC1F.		CaH»
380	0,074						
400	0,051		с л				
408	0,023			250	0,28	300	0,68
		100	0,80	260	0,25	320	0,55
		по	0,56	270	0,23	340	0,46
		120	0,42	280	0,21	360	0,39
		130	0,33	290	0,19	380	0,33
		140	0,26	300	0,17	400	0,28
		150	0,22	310	0,15	420	0,25
180	0,69	160	0,19	320	0,13	440	0,22
200	0,48	170	0,16	330	0,12	460	0,19
220	0,36	180	0,14			480	0,17
240	0,28	190	0,13	340	0,10	500	0,15
260	0,23	200	0,11	350	0,088	520	0,13
280	0,19	210	0,10	360	0,072	540	0,12
300	0,16	220	0,097			560	0,10
320	0,13	230	0,089				
340	0,11	240	0,080				
360		250	0,071				
380	0^069	260	0,060				
400	0,055	270	0,046				«-sHie
420	0,036	280	0,030	290	1,06		
426	0,024	283	0,022	300	0,90	290	0,90
				310	0,77	300	0,82

Продолжение табл. 16. 15

Т	1	Т	1	Т	' 11 — l)		
320	0,64	193	0,97	393	0,18	340	0,43
340	0,51	203	0,79	413	0,15	350	0,39
360	0,42	213	0,65	433	0,125	360	0,35
380	0,35	223	0,55	453	0,104	370	0,32
400	0,29	233	0,47	473	0,086	380	0,30
420	0,25	243	0,41	493	0,068	390	0,28
440	0,21	253	0,36	513	0.048	400	0,26
460	0,18	273	0,33			410	0,24
		293	0,30			420	0,22
		303	0,27				
	K-C,Hi4	313	0,24		C2H4O2		
		323	0,22				«30-CsHi8
		333	0,20				
		343	0,166			100	0,232
300	0,32	353	0,140	303	0,79	ПО	0,214
305	0,31	373	0.118	313	0,69	120	0,198
310	0,29			323	0,62	130	0,183
320	0,27			333	0,55	140	0,169
330	0,25			353	0,45	150	0,156
340	0,23		CeH,	373	0,38	160	0,146
350	0,21			393	0,32	170	0,135
360	0,20			403	0,30	180	0,125
		273	10,2			190	0,115
		283	6,5			200	0,106
		293	4,4			210	0,097
		303	3,12			220	0,089
280	0,28	313	2,30			230	0,080
290	0,26	323	1,80	153	2,31	240	0,072
300	0,24	333	1,50	173	1,25	250	0,064
310	0,22	343	1,28	193	0,77	260	0,054
320	0,21	353	1,10	203	0,64	270	0,037
330	0,19	363	0,94	213	0,55		
340	0,18	373	0,80	223	0,47		
350	0,16	383	0,69	233	0,42		
360	0,16	393	0,59	243	0,38		
370	0,15			253	0,34		
375	0,14			263	0,31		
				273	0,28		
			CeHaNOo	283	0,26		
	C,Hi4			293	0,24	213	2,47
				303	0,22	223	1,83
		273	3,1			233	1,43
		283	2,5			243	1,16
290	0,76	293	2,0			253	0,97
300		303	1,7		H—C0H1A	263	0,83
320	0^56	313	1,4			273	0,71
340	0,46	323	1,2			283	0,62
360	0,38	333	1,1			293	0,55
380	0,38	353	0,87	290	0,76	303	0,49
400	0,27	373	0,70	300	0,67	313	0,44
420	0,22			320	0,58	323	0,39
440	0,19			340	0,42	343	0,32
460	0,16			360	0,34	363	0,28
			C4H8O,			383	0,23
						403	0,19
	(C,H5)20				«-QoH,,	423	0,16
						443	0,14
		293	0,48			463	0,12
		313	0,38			483	0,10
153	4,25	333	0,31	300	0,67	503	0,084
163	2,54	353	0,25	310	0,59	523	0,070
173	1,71	373	0,21	320	0,53	543	0,056
183	1,24			330	0,47	563	0,041

263	1,15
273	0,97
283	0,83
293	0,71
303	0,63
313	0,56
323	0,50
333	0,44
343	0,40
353	0,37
363	0,34
373	0,31
383	0,28
393	0,26
403	0,24
413	0,23
423	0,21

«-СюН,,

243	2,51
253	1,93
263	1,55
273	1,27
283	1,07
293	0,91

223	1,7
233	1,4
253	0,99
273	0,73
293	0,52
313	0,41
333	0,33
353	0,27
373	0,22
393	0,19
413	0,16
433	0,15
453	0,13
473	0,11
493	0,10
513	0,089
533	0,081
553	0,073
573	0,067

Керосин

223	11,5
233	7,3
253	3,6

	2,2
	1,5
	1,1
	0,83
	0,66
	0,54
	0,46
	0,39
	0,34
	0,30
	0,26
	0,23
	0,21
	0,19
	0,17
	0,16

ССl4

	1,7
	1,4
	0^97
	0,84
	0,74
	0,65
	0,59
	0,52
	0,47
	0,43
	0'35
	0,3'3
	0,28
	0,23
	0,20

СНзОН

173	16
193	5,7
213	3,0
233	1,8
253	1,2
273	0,82
293	0,58
313	0,45
333	0,35
353	0,27
373	0,21
393	0,17
413	0,14
433	0,11
453	0,088
473	0,072
493	0,058
513	0,046

С2Н5ОН (96%

	1,8
	1,2
	0,82
	0,59
	0,43
	0,32
	0,24
	0,19
	0,15
	0,12
	0,095
	0,072
	0,049

СзНвОз

273	12100
	600
	330
	180
	102
	59
	35
	21
	13
	5,2
	1,8
	1,0
	0,45
	0,22

С4НИО

	4,25
	1,71
	0,97
	0,65
	0,47
	0,36
	0,30
	0,24
	0,20
	0,17
	0,14
	0,12

к-СзН,ОН

	54,6
	31,6
	20,2
	13,5
	9,50

	6,90
	5,10
	3,85
	2!20
	1,72
	1,38
	0,92
	0,64
	0,54
	0,46
	0,39
	0,34
	0,29
	0,25
	0,21
	0,18
	0,14
	0,11

ызо-СзН,ОН

213	66,1
223	37,6
233	23,2
243	14,9
253	10,1
263	6,8
273	4,6
283	3,26
293	2,39
303	1,77
313	1,33
323	1,03
333	0,80
343	0,65
353	0,52

к-СзНэОН

223	34,7
233	22,4
243	14,6
253	10,3
263	7,4
273	5,19
283	3,87
293	2,95
303	2,28
313	1,78
323	1,41
333	1,14
343	0,93
353	0,76

Продолжение табл. 16.17

Т	ч
	0,63
	0,54
	0,46

*н-С*пН.4

263	2,16
273	1,74
283	1,42
293	1,18
303	1,01
313	0,87
323	0,76
333	0,67
343	0,60
353	0,54
363	0,48
373	0,44
393	0,36
413	0,31
433	0,27
453	0,23
473	0,20

'^-СхзНгв

273	2,96
283	2,34
293	1,88
303	1,56
313	1,31
323	1,11
333	0,97
343	0,85
353	0,75
363	0,67
373	0,60
393	0,49
413	0,41
433	0,35
453	0,30
473	0,26

Т	ч
	«-СмНзо
283	2,96
293	2,32
303	1,89
313	1,56
323	1,32
333	1,14
343	0,99
353	0,87
363	0,77
373	0,68
	«-СиНз2
293	2,84
303	2,29
313	1,87
323	1,57
333	1,34
343	1,16
353	1,01
363	
373	0^79
	«-С1вНз4
293	3,45
303	2,75
313	2,32
323	1,85
333	1,56
343	1,34
353	1,16
363	1,01
373	0,89
393	0,72
413	0,58
433	0,49
453	0,41
473	0,35
493	0,30
513	0,26
	Н-(::i7ii36
303	3,29
313	2,65
323	2,17
333	1,83
343	1,56
353	1,34
363	1,16
373	1,01

Т	l
393	0,79
413	0,66
433	0,55
453	0,46
473	0,39
493	0,34
513	0,30
533	0,26
553	0,23
573	0,20
	н-СхвНза
303	3,81
313	3,06
323	2,49
333	2,06
343	1,75
353	1,48
363	1,30
373	1,13
	С
313	4,07
323	3,26
333	2,66
343	2,22
353	1,19
363	1,16
373	1,14
383	1,09
413	0,88
433	0,72
453	0,60
373	0,50
493	0,43
	C5H10
273	0,56
283	0,49
293	0,44
303	0,39
313	0,35
	K-CjHioOa
290	0,58
300	0,53
320	0,42
340	0,34
360	0,27

Таблица 16.18. Вязкость жидких металлов, Ю-з Па-с (3]

Т. к	Li	Na	K	Rb	Cs	Hg	Bi	Pb	Sn	Zn	Sb
300			—	—	—	1,6		—		—	
400	—	0,61	0,41	0,44	0,42	1,2	—	-	-	-	—
500	0,53	0,42	0,30	0,32	0,32	1,0	—	—	1,9	—	—
600	0,43	0,33	0,24	0,26	0,25	0,91	1,7	2,6	1,6	-	—
700	0,36	0,27	0,20	0,22	0,22	0,84	1,2	1,3	1,3	3,3	—
800	0,31	0,23	0,17	0,19	0,19	0,79	—	1,8	1,2	2,6	—
900	0,28	0,20	0,15	0,17	0,17	0,76	1,0	1,5	1,0	2,1	1,6
1000	0,25	0,18	0,14	0,15	0,15	0,73	—	1,3	0.93	1,8	1,2
1100	0,22	0,16	0,12	0,14	0,14	0,71	—	1,2	—	-	1,1
1200	0,21	0,15	0,11	0,13	0,13	—	—	—	—	—	—
1300	0,19	0,14	0,10	0,12	0,12	—	—	—	—	—	—
1400	0,18	0,13	0,098	0,11	0,12	—	—	—	—	—	—
1500	0,17	0,12	0.093	0,11	-	—	—	—		-	—
1600	0,16	0,12	0,088	–	—	—	—	—	—	—	
17(X)	0,15	0,11	0,083	-	—	—	—	—	—	-	—
1800	0,14	0,11	0,079								

Таблица 16.19. Вязкость расплавов некоторык солей и оснований, 10-з Па-с [5]

AgBr		HgBr^		KNO,		LiNOa		N,04		1120	**1,28**	1020	440	850	3,28
882	1,86	520	3,0	620	2.73	530	6,48	274	0,52	1150	1,14	1070	300	870	3,06
922	1,66	530	2,0	630	2,58	560	5,48	278	0,49	1170	1,02	1120	210	880	2,95
961	1,49			650	2,31	580	4,70	282	0,47	1200	0,91				
1043	1,22	KBr		670	2,09	600	4,32	288	0.44	**1220**	**0,82**	PbBr$_2$		SnCl$_4$	
1076	1,19			690	1,90	630	3,63			1250	0,75				
		1020		710	1.74	660	2,49	NagAlFe		1270	0,70	0	10,2	303	0,81
AgCl		1050		730		700	2,05					0	8,06	313	0,72
876	1,61			750	1^48			1270 1 2,8		NaNOs		0	7,0	323	0,67
905	1,47	KCI		770						710	1,62	0	6,1		
942	1,37	**1060**	1,4	790		MgCI,		NaBr		730	1,52	0	5,4		
1007	1,19	1110	1,2	810								0	4,7		
h		1200	1,0	820	1,21	)80 1 4,12		1035	1,42	NaOH		0	4,1		
878	3,03	1310	0,71					1053	1,28						
900	2,75									620	4,0				
970	2,38	K^Cr^O,		670	2,3	278	1,21	NaCl		670	2,8	PbCI^			
1000	2,12	670	13,2	720	1,7		1,12			720	2,8				
1100	1,56	690	11,7	770	1,3		1,04	590	2,83	770	1,8	770	5,53		
		710	10,4	820	1,0		0,97	610	2,53	820	1,5	790	4,66		
CaCl^		730	9,2	870	0,8		0,91	630	**2,28**			810	4,02		
1070 I 4,94		750	8,1					650	**2,08**	NaPOa		830	3,59		
		770	7,0					670	1,90	920 1250					
									1,74	970 700					
									1,43						

Продолжение табл. 16.19

Таблица 16.20. Вязкость жидкого сплава свинец — олово при различных значениях температуры и молярной доли свинца, 10-з [1]

т. к	Молярная доля Pb				
	0,000	0,02Г1	0,300	0,382	1,000
460		—	—	4,2	—
470		–	5,0	–	–
475		–	–	2,6	–
480	—	—	3,0	2,1	–
500	–	–	2,5	2,1	–
505	2,6	–	–	–	–
510	2,0	4,2	–	–	–
520	–	1,9	–	–	–
525			2,2	2,0	–
540	1,8	1,8	–	–	–
550			2,2	2,2	–
560	1 ,7	1,6		–	–
575			2,1	2,3	—

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

г, к	Молярная доля Pb				
	0,000	0,025	0,300	0,382	1,000
580	1,6	1,6			—
600	1,6	1,5	2,0	2,3	3,0
612,5	–	–	–	–	2,8
620	1,5	1,5	–	–	–
625	–	–	2,0	2,3	2,6
637,5	–	–	–	–	2,5
640	1,5	1,5	–	–	–
650			2,0	2,3	2,4
660		1,4	–	–	–
675		–	1,9	2,2	2,2
7оО		–	1,8	2,2	2,2
725		–	1,8	–	2,0
750	–	–	–	–	1,9
775					1,9

Таблиц; 16.21 Вязкость жидкого сплава железо—углерод при различных значениях температуры и молярной доли железа, 10'® Иа-с [1J

Т. К	Молярная доля железа								
	0,9514	0,9580	0,9715	0,9790	0,9870	0.9936	0,9960	0,9975	0,9992
1550		8,5			—	—	–	-	-
1575		8,0	–	–	–	–	–		
1600		7,5	–	–	–	–			
1625		7,0	9,2	–	–	–			
1650	3,8	6,6	8,5	–	–	–			
1675	3,3	6,1	7,9	–	–	–	–	–	
1700	2,9	5,7	7,2	7,2	–	–	–	–	
1725	2,5	5,2	6,6	6,8	7,7	–	–		
1750	2,2	4,7	6,0	6,4	7,0	–	–		
1775			5,5	6,0	6,4	–	–		
1800		3,9	5,1		5,8				
1825		3,5	4,7	5',2	5,2		5,7	4,9	7.6
1850		3,2	4,4	4,9	4.8	4,7	4,9	4,4	6,4
1875			4,1	4,6	4,4	4,2	4,3	4,1	5.7
1900			3,9		4,1	3,9	3,9	3,9	5,2
1925					3.9	3,7	3,6	3,8	4,9
1950					3,7	3,6	3,4	3,6	4,6
1975		—	—	—	3,5	3,4	3,3	3,4	–
2000	–	—		—		3,3			

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Touloukian Y. S. e. a. Viscosity. N. Y.: NBS Edition,

2. Stephan K., Lucas K. Viscosity of dense fluids. N. Y., Lond.: Academ. Press. 1979.

3. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1972.

4. Голубев И. Ф., Гнездилов Н. Е. Вязкость газовых смесей. М.: Изд-во стандартов. 1971.

5. Справочник химика. М,—Л.: Химия. 1966.

ГЛАВА 17

ДИФФУЗИЯ

А. в. Елецкий

17.1. ВВЕДЕНИЕ

Диффузия — процесс выравнивания концентрации частиц (атомов, молекул, ионов, электронов) в среде. При наличии градиента концентрации -^N частиц в веществе возникает поток этих частиц j, выравнивающий их концентрации. Связь между потоком и коэффициентом диффузии ***D*** выражается законом Фика

$$j = - D\, y\, N . \qquad (17.1)$$

Это соотношение справедливо, когда размер системы в направлении градиента много больше длины свободного пробега частиц в среде, а изменение концентрации на расстоянии длины свободного пробега много меньше характерного значения концентрации частиц ***N.*** Кроме того, предполагается отсутствие внешних полей, градиентов температуры и давления.

17.2. ДИФФУЗИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ В ГАЗАХ

В идеальных газах, где плотность нейтральных частиц (атомов, молекул) ***N*** удовлетворяет условию

$$N \qquad l/cg \qquad (17.2)$$

(По^Ю^®-^ 10-^ см — характерный радиус действия межмолекулярных сил), диффузия определяется парными соударениями пробной частицы с атомами или молекулами. Поэтому вплоть до очень высоких давлений * коэффициент диффузии обратно пропорционален плотности частиц газа и выражается через характеристику парного соударения пробной частицы и частицы газа — диффузионное сечение рассеяния а*.

Согласно элементарной кинетической теории газов выражение для коэффициента диффузии малой примеси в газе, состоящем из одного сорта частиц, а также для коэффициента самодиффузии имеет вид

$$\{vM/3, \qquad (17.3)$$

* Область давлений, где указанная зависимость выполняется с достаточно высокой точностью (погрешность 2—5%), зависит от температуры. Вблизи критической точки эта зависимость может существенно нарушаться.

где $V = У^2кТ/у.$ — средняя относительная скорость соударения частиц примеси и частиц газа; ц — приведенная масса сталкивающихся частиц; ***Т*** — температура газа; ***X=l/Na**** — длина пробега пробных частиц в газе; iV — плотность частиц газа. Соотношение (17.3) является точным, если а* не зависит от энергии сталкивающихся частиц. В противном случае понятие длины пробега теряет определенность и указанное соотношение справедливо для эффективных величин. Принято приводить значения коэффициента диффузии не при постоянной плотности газа, а при постоянном давлении. В этом случае с учетом уравнения газового состояния ***p=NkT*** получаем зависимость

$$D = Oo(Г/273)'"\backslash$$

где Do — коэффициент диффузии в нормальных условиях. Это соотношение справедливо при тех же условиях, что и соотношение (17.3).

Таблица 17.1. Параметры зависимости (17.4) [1]

Газ	D_{oo}, см^/с		Температурный вТГк	Газ	Do, СМ^С
He	1,62	1,71	14—296	На	1 OS
Ne	0,452	—		CO	0Л75
Ar	0,156	1,92	77-353	HC1	0,125
Kr	0,08	–	–	HBr	0,079
Xe	0,048	—	–	COo	0,097
N,	0,17	1,9	77-353	CHл	0,206
Oa	0,18	1,92	77-353	H^o (пар)	0,277
	0,0165	1,6	144—296		

Коэффициент самодиффузии газов. В табл. 17.1 представлены значения коэффициентов самодиффузии Do при нормальных условиях (7'=273 К, р=0,1 МПа). Дан интервал температур, внутри которого коэффициент диффузии можно аппроксимировать степенной функцией

$$D (Г) = 00(7/273)"; \qquad (17.4)$$

приведены значения параметра а.

Таблица 17.2. Коэффициент самодиффузии газов при высоких температурах, cmVc (давление атмосферное; теоретические данные получены с использованием потенциала межатомного взаимодействия, восстановленного из экспериментов по рассеянию атомных пучков) [1]

Газ	Температура, 10^3 К																			
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,7	7	8	9	10	11	12	13	14	15
He	13,3	26,9	46,7	70,3	98,6	130	167	207	250	299	350	407	467	595	738	898	1070	1260	1460	1670	1840
Ne	3,9	7,76	12,7	18,5	25,2	32,6	41,1	50,4	60,7	72,0	83,8	96,5	110	139	172	207	244	284	325	318	414
Ar	1,51	3,0	5,03	7,50	10,4	13,9	17,8	22,1	26,8	31,9	37,4	43,3	49,5	62,8	77,4	93,2	111	129	148	169	190
Kr	0,85	1,72	2,83	4,14	5,7	7,4	9,3	11,4	13,8	16,4	19,2	22,2	25,5	32,6	40,7	49,6	59,6	70,2	81,5	93,7	107
Xe	0,50	1,01	1,65	2,43	3,32	4,32	5,42	6,6	8,0	9,4	10,9	12,6	14,4	18,2	22,5	27,2	32,4	37,7	43,4	49,4	55,7
N_2	1,56	3,08	5,05	7,5	10,4	13,8	17,6	21,9	26,6	31,8	37,3	43,2	49,6	62	79	96	113	133	153	174	197

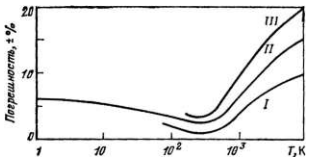


Рис. 17.1 Погрешность данных, представленных табл. 17.3, в зависимости от температуры

В табл. 17.2 приведены значения коэффициента самодиффузии газов при высоких температурах

Коэффициент взаимной диффузии в газах. В двухкомпонентной смеси газов при отсутствии внешних полей, химических реакций, а также градиентов температуры и давления потоки ji и j2 частиц первого и второго сортов выражаются соотношениями

$$ii = nDi2\ grad\ x^;$$

$$h = -nD^.gr\&dx^, \qquad (17.5)$$

где ***n*** — полная плотность частиц; ***x,*** и ***x^*** — относительная концентрация частиц первого и второго сорта. Эти соотношения справедливы в системе отсчета, в которой отсутствует результирующий поток частиц (ji+j2=0), поскольку, кроме того, ***Xi + X^^l, йц=021.***

Коэффициент диффузии ***DAB*** частиц произвольного сорта в смеси двух газов Л и В определяется соотношением (закон Бланка), справедливым с погрешностью до нескольких процентов:

$$_{IB} \ldots \qquad (17.6)$$

где ***Dia И DiB*** — коэффициент взаимной диффузии пробной частицы в газах Л и В при давлении, равном суммарному давлению в рассматриваемой смеси.

Основным источником информации о коэффициенте взаимной диффузии в газах является эксперимент Точность, с которой известны значения этого коэффициента, существенно зависит от интервала температур, а также от сорта исследуемых газов. Представленные ниже результаты измерений коэффициентов взаимной диффузии различных пар газов разделены на четыре группы в зависимости от класса точности (табл. 17.3, 17.4) Погрешность, характеризующая значения коэффициентов взаимной диффузии первых трех групп (I, И, III), видна из рис. 17.1, а для четвертой группы соответствующие сведения представлены в табл. 17.4.

В табл. 17.5 и 17.6 приводятся параметры, входящие в эмпирические зависимости коэффициентов взаимной диффузии при атмосферном давлений. Для систем, представленных в табл. 17.5, эта зависимость имеет вид

$$D \quad Do(r/273)«exp \quad 5/\Gamma — S'/T^), \qquad (17.7)$$

где S, ***S'*** — эмпирические параметры, а экспоненциальный множитель без потери точности может быть опущен для температур свыше 200 К.

Для "систем, представленных в табл. 17.6, эмпирическая зависимость имеет вид

$$D \quad Do\ (\Gamma/273)« exp\ \{—SIT\}, \qquad (17.8)$$

причем экспоненциальный множитель можно заменить единицей при 7">20 ***S.***

В табл. 17.7, 17.8 приведены значения коэффициента диффузии метастабильных атомов в инертных газах.

17.3. ДИФФУЗИЯ В ЖИДКОСТЯХ

Диффузия больших молекул в растворителе. Диффузия в жидкостях обусловлена процессами многочастичного взаимодействия пробной частицы с частицами жидкости. Поэтому теоретическое определение коэффициентов диффузии в жидкостях весьма затруднено и практически единственным источником надежной информации является эксперимент. Исключение составляет случай диффузии больших молекул в растворителе с низкой молекулярной массой, для описания которого применима формула Эйнштейна—Стокса

$$^12 \quad kTlb^r-q, \qquad (17.9)$$

где г — радиус большой молекулы, форма которой аппроксимируется сферой; t) — динамическая вязкость жидкости. В соотношении (17.9), которое справедливо для многих систем, величина г остается неопределенным параметром, который обычно известен с точностью до множителя 2.

Диффузия в растворах. Коэффициенты диффузии для многих слабых растворов хорошо аппроксимируются следующим эмпирическим выражением [5]:

(17.10)

где /<1 — коэффициент, не зависящий от свойств растворителя, а Ki—коэффициент, не зависящий от свойств растворенного вещества. Коэффициенты К\ и К2 зависят от температуры, однако если известно значение Вц при температуре Г,, то величина Z)i2(7"2) может быть определена на основании следующего соотношения:

(17.11)

где т|2(7'2), Tl2(7"i) —динамическая вязкость растворителя при температурах ***Т^*** и ***Т*** соответственно. Погрешность, характеризующая соотношения (17.10) и (17.11), составляет десятки процентов. Подобная погрешность вообще характеризует имеющуюся информацию о коэффициентах диффузии в жидкостях. Значения Ki и Ki представлены в табл. 17.9 и 17.10.

Коэффициент диффузии в сильноразбавленном растворе электролита выражается соотношением

$$[1A+-f\ 1A-J \quad F$$

где /?==8,314 Дж/(К-моль) — разовая постоянная; ***Т*** — температура; 'ко^, ко" — проводимость раствора по положительным и отрицательным ионам в пределе нулевых концентраций, А-г=экв/(см^-В); п^, п' —валентности катиона и аниона соответственно; f=9 6 485 Кл/моль — число Фарадея. Значения ионной проводимости Хц^ некоторых водных растворов приведены в табл. 17.11. Значения коэффициента диффузии некоторых веществ, растворенных в воде, приведены в табл. 17.12 и 17.13. Следует отметить, что в жидкостях, где существенную роль в процессе диффузии играет многочастичное взаимодействие, неприменимы соотношения взаимности, т. е. Di^^^Qai

В табл. 17.14—17.20 приведены значения коэффициента диффузии в различных жидкостях и расплавах.

Таблица 17.3. Погрешность значения коэффициента диффузии для систем трех групп,

Температура, к

He—Ne, He-Ar, He-Kr, He-Xe: Ne-Ar, Ne-Kr, Ne-Xe, Ar-Kr, Ar-Xe, Кг—Xe, H^ — N2 sHe-'iHe, He—Иг, He—N^, He—CO, He—O2, He—воздух, He-COr, Иг—Ne, H^-Ar, H^-Kr, Ho-D^, CO-воздух, CO-CO2, Ns-Ar, N2-CO, N2-CO2 АГ-CH4, Ar-CO, Ar—CO2, Ar-воздух, Ar-SFe, Hr-Xe, H2 —CH4, H2-O2, H2-SFe, CH4—He, CH4—N2, CH4-O2, CH4-воздух, CH4-SFe, N2-Ne, N2-Kr, N^-Xe, N2-CH4, N„-02, N2—SPe, 0„-Ar, 0,-C02, 02-SFe, CO, —воздух, CO2-N2O, CO, —SF„, SF.-He, SFe-воздух, CO-Kr, CO-O2, CO-воздух, CO—CO„, CO-SFe

Таблица 17.4. Погрешность значений коэффициентов взаимной диффузии для систем IV группы

Система	Интервал температур. К	Погрешность, %
H2O-N2	282-373	4
H2O-O,	282-1070	7
H2O —воздух	282—1070	5—10
HjO - CO2	296-1640	7-10
COs-Ne	195—625	3-5
CO2-C3H8	298-550	3-5
H-Hr	300	5
	1000	30
H-N„; 0-N„;	300	10
0 - 0	1000	25
H-He; H-Ar;	300	15
0-He; 0 - Ar	1000	30

Таблица 17.5 Параметры выражения (17.7), действительные в температурном интервале Г1—10^ К [2]

Система			S. К	S'.	%	"5 Й
me-me	1,55	1,501	-0,963	1,894	1,74	II
Ne - Ne	0,235	1,509	1,87		65	I
He-Ar	0,635	1,552	1,71		77	I
He-Kr	0,503	1,609	-32,65	2036	77	I
He-Xe	0,391	1,644	-68,87	5416	169	I
He-H2	1,32	1,510	—	—	90	II
He - N2	0,613	1,524	—	—	77	II
He-CO	0,613	1,524	—	—	77	II
Ne-Ar	0,278	1,546	1,82	1170	90	I
Ne-Kr	0,242	1,555	20,4		112	I
Ne-Xe	0,197	1,584	10,1		169	I
Ar-Kr	0,14	1,556	47,3	„	169	I
Ar-Xe	0,122	1,563	59,9		169	I
Ar-N2	0,79	1,519	39,8		242	II
Kr-Xe	0,0812	1,608	52,7		169	I
КГ-H2	0,664	1,564	26,4		77	II
H2-D2	0,99	1,500	6,072	38,10	14	II
	0,66	1,548	—280	1067	65	I
	0,66	1,548	-2,80	1077	65	II
N2-co	0,175	1,576	36,2	3825	78	II

Таблица 17.6. Параметры эмпирической зависимости (17.8) [2]

Система	$D_{оо}$, СМ^С		S. К	Температурный интервал, К	Группа точное-
He - CH4	0,57	1,750		298-10*	III
He-02	0,45	1,710		244—10*	II
He — воздух	0,62	1,729		244-10*	II
He-COg	0,52	1,720		200—530	II
He — SFe	0,35	1,627		290-10*	III
Ne-Ha	0,99	1,731	—	90—10*	II
Ne-N2	0,28	1,743	—	293-10*	III
Ne-CO	0,22	1,776	—	195—625	III
Ar - CH4	0,172	1,785	—	307-10*	III
Ar-Ng	0,17	1,752	—	244—10*	II
Ar —CO	0,17	1,752		244—10*	III
Ar —O2	0,167	1,736		243—10*	III
Ar — воздух	0,165	1,749		244—10*	III
Ar - CO2	0,177	1,646	89,1	276-1800	III
Ar-SFe	0,114	1,596	145,4	328-10*	III
Kr-N2	0,13	1,766		248—10*	III
Kr —CO	0,13	1,766	2	248—10*	III
Xe-H2	0,54	1,712	16,9	242-10*	III
Xe-N2	0,106	1,789	—	242-10*	III
H2-CH4	0,62	1,765	—	293-10*	III
H2-O2	0,69	1,732	—	252-10*	III
H2 — воздух	0,66	1,750	—	252-10*	II
H2 - C02	0,56	1,750	11,7	200-550	II
	0,52	1,570	102,5	298-10*	III
	0,2	1,750		298-10*	III
CH4-02	0,22	1,695	44,2	294-10*	III
CH4 — воздух	0,186	1,747	—	298-10*	III
CH4-SFe	0,119	1,657	69,2	298-10*	III
	0,182	1,724	—	285-10*	III
	0,204	2,072	—	282-373	IV
N2-CO2	0,208	1,570	113,6	288-1800	II
N2 - SF.	0,122	1,590	119,4	328-10*	III
CO-O2	0,175	1,724		285-10*	III
CO — воздух	0,182	1,730		285—10*	III
CO — CO2	0,142	1,803		282—473	III
CO - SFe	0,129	1,584	139,4	297-10*	III
O2 - H2O	0,207	2,072		282-450	IV
O2-H2O	0,264	1,632		450-1070	IV
O2-CO2	0,174	1,661	61,3	287-1083	III
02-SFe	0,138	1,522	129,0	297-10*	III

продолжение табл. 17.6

Система	Do, СМ^С		S. к	Температурный интервал, К	Группа точнос-
HjO — воздух	0,205	2,072		282—450	IV
HgO — воздух	0,26	1,632		450—1070	IV
COg — воздух	0,207	1,590	102,1	280-1800	IV
SFe — воздуX	0,126	1,576	121,1	328-10«	IV
	0,41	1,500	307,9	296-1640	IV
	0,095	1,866	−	195-550	III
CO^-SFe	0,069	1,886	−	328-472	III
H - H e	2,35	1,732	−	275-104	IV
H —Ar	0,112	1,597	−	275-10^	IV
H - H ,	0,184	1,728		190-10«	IV
N - N ,	0,29	1,774		280-10«	(V
0 - №	0,84	1,749		280-10«	IV
O —Ar	0,23	1,841		280-10«	IV
O —N„	0,28	1,774		280-10«	IV
O - O ,	0,28	1,774	_	280-10«	IV

Таблица 17.7. Коэффициент диффузии метастабильных атомов инертных газов в собственном газе при давлении 133 Па (1 мм рт. стЛ, см^/с (погрешность данных не превышает 10 %) [3]

Атом	Температура, *К*					
	20	**40**	**77**	**150**	**300**	**500**
He(23S)	60	100	160	260	460	710
He (2>S)	45	***75***	120	210	370	570
	19	33	56	-	-	-
Ar ***ер,)***	**8**	13	20	34	64	—
Kr (Ф^)	−	12	12	20	38	51
Xe(Ф,)			8	13	22	33

17.8. Коэффициент диффузии метастабильных атомов ртути в инертных газах при различной температуре и атмосферном давлении ***D,*** см^/с [4]

Атом инертного газа	Состояние атома ртути	Температура, К							
		296	**380**	**475**	**515**	**580**	**680**	**780**	**890**
He		0,59	1,1		2,1	—	—	—	5,8
	б з р.	0,51	1,0		1,9	–	–	–	5,3
He	***б'Ро***	0,31	0,57	0,93	–	1,4	1,9	2,4	2,9
	б'Ро	0,27	0,48	0,86	–	1,3	1,8	2,3	2,9
Ar	б **ЗА,**	0,16	0,28	0,46	–	0,74	0,97	1,2	1,6
		0,12	0,21	0,39	–	0,56	0,80	1,0	(.4
Kr	бЗР	0,1	0,19	0,32		0,50	0,65		1,1
		0,07	0,13	0,23		0,35	0,49		
Xe	***б^Ро***	0,06	0,13	0,23		0,33	0,45	0,58	0,7
	б з р.	0,048	0.10	0,18		0,27	0,37	0,47	

17.4. ДИФФУЗИЯ В ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Основным источником информации о коэффициентах диффузии в твердом теле, как и в жидкости, является эксперимент. При этом вследствие крайней чувствительности результатов измерений к степени чистоты исследуемого образца, способу его приготовления и к колебаниям температуры результаты различных измерений обычно характеризуются разбросом в пределах порядка величины. В связи с этим данные, представленные в таблицах, являются результатом усреднения по большому числу экспериментальных данных и в силу произвольного характера усреднения справедливы в лучшем случае по порядку величины.

Температурная зависимость коэффициента диффузии в твердом теле хорошо описывается полуэмпирической формулой

(17.13)

где ***Do*** — фактор диффузии; ***Q*** — энергия активации. Соотношение (17.13) выполняется в широком диапазоне температур в пределах точности измерений коэффициента диффузии. Для веществ, имеющих кристаллическую структуру, коэффициент диффузии является тензором. Приведенные ниже данные являются в основном результатом усреднения этого тензора по направлениям. В отдельных случаях приведены значения коэффициента диффузии в направлениях, параллельном ***(D\\)*** и перпендикулярном (Dx) главной оси кристалла. В табл. 17.21—17.40 представлены значения параметров, входящих в (17.13), а также интервал температур, где производились измерения.

Таблица 17.9. Значения для некоторых растворенных веществ в разбавленном растворе [4]

•	Растворенное вещество	*m*, к	*i*	Растворенное вещество	*m*, к	b *ъ*
i'.	Аллиловый спирт	288	2,3	Пиридин	293	2,7
				Пропиловый спирт	288	2,2
ïÏ	Анилин	288	2,2			
f	Ацетон	288	3,5	Пропионовая кислота	288'	3,0
	Бензальдегид	288	2,4	Тетрах лорметан	298	3,6
	Бензол	298	3,5			
	Б	288	2,4	Трихлорметан	288	3,3
	Бр	288	4,0			
	Б спирт	288	2,0	Толуол	298	3,0
				Уксусная кислота	298	2,.3
	Вода	298	2,6			
	1,2-Дибромэтан	288	2,9	Фенол	278	1,9
				Фурфурол	288	2,2
	Диэтиловый	288	3,8	Хлоральгид-	288	2,0
	Изоаллиловый спирт	288	2,3	Хлорбензол	288	2,6
				Этиловый **спирт**	288	2,5
	Иодметан	280	3,9			
	Метиловый спирт	288	2,9			
	Муравьиная кислота	279	4,2			
	Нитробензол	288	2,3			

17.10. Значения /Та для различных растворителей [5]

Растворитель	*m*. К	*к^*. 10-» СМ-С-J/2
Бензол	288	5,9
Бромбензол	298	5,1
Вода	298	4,1
Метиловый спирт	288	6,7
Тетрахлорметан	298	4,2
Толуол	298	6,1
Хлорбензол	298	5,7
Этиловый спирт	298	3,8

Таблица 17.11. Предельные (при нулевой концентрации) значения ионной проводимости в воде при *Т* 300 К, Ат-экв/Гсм«-В). Данные приведены к концентрации 1 г-экв/см^ [6]

Катион		Анион	
№2	350	о н -	198
Li^	38,7	C1-	76,3
	50,1	Br-	78,3
	73,5	I-	76,8
NH;	73,4	NO;	71,4
Ag^	61,9	ClO4	68,0

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

Катион		Анион	
Tl+	74,7	н с о -	44,5
1/2 Mg	53,1	HCO7	54,6
1/2Ca2+	59,5	CHзCO^	40.9
l/2Sr2+	50,5	ClCH^CO^	39,8
1/2 Ba2+	63,6	CNCHaCOJ-	41,8
1/2CU2+	54	CHзCH,CO^	35,8
1 /2	53	CHз(CH2)2CO^	32,6
1/3 La3+	69,5	CeHsCO^	32,3
1/3CO(NH4+	102	HC207	40,2
			74,2
		1/2S02-	80
		1/3 Fe (CN)3-	101
		1 /4 Fe (CN)^-	111

Таблица 17.12. Коэффициент диффузии неорганических веществ, растворенных в воде [1]

§ l e	1 ! 1 -	M кС	l t q-2	l | i Ш	SR gg i i	кС	T Q
ВГ2	0,00105	300	1,25	C0Cl2	0,0062	291	0,7
	0,00173	300	1,24		0,0127	**284**	0,73
	0,00183	300	1,24	CuCi,	1,5	**283**	0,5
	0,00193	300	1,23	**CUSO4**	0,1	290	0,45
	0,00230	300	1,22		0,5	290	0,34
	0,00309	300	1,20		0,95	290	0,27
	0,00429	300	1,19				
	0,00501	300	1,18		**0**	**300**	**2,5**
CO2	0	291	1,46				
CO	0	300	2,67	Hs	**0**	**291**	**3,6**
CaCl^	0,29	282	0,79	HCl	**0**	283	2,2
	0,37	282	1,09		**0**	298	3,1
	1,5	282	**0,84**		0,02	283	2,1
CdS04	**0**	290	**0,35**		0,02	298	3,0
	0,5	290	0,34		0,05	283	2,0
	1,0	290	0,33		0,05	298	2,9
	1,5	290	0,44		0,2	283	2,1
	2,0	290	0,43		0,2	298	3,0
	3,0	290	0,44		0,35	283	2,1
	3,5	290	0,34		0,35	298	3,1
	4,5	290	0,36		0,43	273	1,6
	5,5	290	0,4		1,0	298	3,6
	6,5	290	0,45		2,0	273	1,8
	7,0	290	0,48		2,0	284	2,5
Cb	0,1	285	1,4		5,0	273	2,2
	0,1	290	1,3		6,0	284	3,1
					8,0	273	2,7
					9,0	285	3,4

Продолжение табл. 18.28 *Продолжение табл. 18.28*

l i	l i			1 1e 11	i t ^ a-		e I Q
HN03	**0,84**	**278**	**1.7**		**4,2**	**291**	**0,11**
	3,0	**279**	**1.8**				
	3,0	**280**	**2,4**	Lil	**1,3**	**283**	**0,93**
	20	**282**	**2,3**				
н„о	**0**	**293**	**0,9**	**MgSOi**	**0,5**	**288**	**0,54**
квг	**1,0**	**283**	**1,2**		**1,0**	**288**	**0,53**
К.СО3	**3,0**	**283**	**0,7**		**3,0**	**288**	**0,59**
					4,5	**288**	**0,73**
КСl	**0,00125**	**298**	**1,96**				
	0,00194	**298**	**1,95**	**N2**	**0**	**291**	**1,63**
	0,00325	**298**	**1,95**	**NH3**	**0,683**	**277**	**1,23**
	0,00585	**298**	**1,94**		**3,55**	**277**	**1,23**
	0,00704	**298**	**1,93**	NaBr	**2,9**	**283**	**1,0**
	0,00980	**298**	**1,92**	Na^COg	**2,4**	**283**	**0,45**
	0,02	**298**	**1,91**	NaCl	**0,05**	291	**1,26**
	0,1	**298**	1,89		0,40	**291**	**1,2**
	0,5	**298**	**1,82**		**1,00**	**291**	**1,24**
	0	**282**	1,7		**2,0**	291	1,29
	0,05	**282**	**1,56**		3,0	**291**	**1,36**
	0,10	**282**	**1,54**		4,0	291	**1,43**
	0,20	**282**	**1,53**		**5.0**	**291**	1,49
	0,50	**282**	**1,55**	Nal	**1,0**	283	**0,93**
	1.00	**282**	**1,61**		**2,0**	283	**1,04**
	1,5	**282**	1,67	**NaNOg**	**0,6**	**286**	**1,04**
	2,00	**282**	**1,73**		3	284	**0,88**
					5	284	**0,96**
KI	**0,01**	273	1,3		**6**	**286**	**0,90**
	0,01	291	**1,7**	**NO**	**0**	**289**	**1,54**
	0,10	**273**	1,24				
	0,10	291	**1,61**	I2	**0,05**	**298**	**1,25**
	1,0	273	**1,21**				
	1,0	291	**1,59**	**0** .	**0**	**298**	**2,60**
	5,5	273	1,37	NaOH			
	5,5	291	**1,8**		**0,02**	**285**	**1,3**
KN03	**0,05**	**291**	1,45		**0,1**	**285**	**1,29**
	0,20	**291**	1,39		**0,9**	**285**	**1,21**
	0,40	**291**	1,35		**3,9**	**285**	1,14
	0,80	**192**	**1,28**	Na,S04	1,4	**283**	0,76
	1,0	291	1,24	NaCHgCOO			
	2,0	291	1,15		**0,2**	285	**0,71**
	2,5	291	1,17	Ni(N03)2			
					0,0088	291	**0,667**
к о н	**0,1**	287	**2,0**		**0,0226**	**291**	**0,822**
	0,9	287	**2,16**		**0,068**	**291**	**0,93**
	3,P	287	**2,82**				
K2S04	**0,02**	293	1,27	PI (N03)2	**0,22**	285	**0,82**
	0,05	293	**1,12**		**0,82**	285	0,76
	0,28	**293**	**1,0**				
	0,95	**293**	**0,92**	ZnS04			
					0,025	293	0,58
LiBr	2,3	283	0,93		0,050	293	0,54
	4,4	283	1,04		0,55	293	**0,12**
LiCl	**0,01**	**282**			2,95	293	0,38
	0,01	291	1Л6	2П(СНзСОО)2	**2**	273	0,139
	1,0	**282**	**0.81**		**2**	291	0,243
	1,0	291	**1.06**				
	4,2	**282**	0,84				

Таблица 17.13. Коэффициент диффузии органических соединений в водных растворах при нулевой концентрации [7]

Растворенное вещество	*a* i-"	1	Растворенное вещество	*a* *ы*	
Аллаксан	293	0,67	Метилцикло-	275	0,48
Арабиноза	293	0,70	пентан		
Ацетамид	293	1,05		283	**0,59**
Ацетон нит-	288	1,26		293	0,85
рил				333	1,92
Анилин	293	0,92	Мочевина	285	0,99
Бензол	275	0,58		293	1,20
	283	0,75		298	1,38
	293	1,02	Никотин	293	0,53
	333	2,55	Пентаэрит-	293	0,69
н-Бутан	277	0,50	рит		
	293		Пиридин	288	0,58
	333	2,'51	Пирогаллол	288	0,56
Винил хлорид	298	1,34	Пропилен	298	1,44
	323	2,42	Рафиноза	293	0,36*
	348	3,67	Резорцин	293	0,77
Гидрохинон	293	0,78	Сахароза	285	0,36
Глицерин	288	0,72	Сероводород	288	1,43
	283	0,63*1			
Глюкоза	288	0,52	**Спирт**:		
Диэтиламин	288	0,97	**аллиловый**	288	0,90
Кислота	288	0,61	бензиловый	293	0,82
винная			бутиловый	288	0,77
Кислота ук-	293	1,19	изоамиловый	288	
сусная			метиловый	288	***U28***
	286	0,91*^	**пропиловый**	288	0,87
Кислота	298	1,21	**этиловый**	283	0,84
бензойная				288	**1,00**
Кислота	293	1,53		298	**1,24**
щавелевая			Уретан	288	0,87
Кофеин	283	0,42	Фурфурол	293	0,87
Лактоза	283	0,46	Этилацетат	0	1,04
Мальтоза	**283**	**0,328**	Этиленгликоль	298	1,16
	293	**0,426**	Этилбензол	275	0,58
Маннит	**293**	**0,605**		283	0,75
Метан	283	0,328		293	1,02
	293	0,85		333	2,55
	333	3,55			

Концентрация 0,125 моль/л.
Концентрация 0,01 моль/л.
Концентрация 0,05 моль/л.

Таблица 17.14. Коэффициент диффузии воды в органических растворителях, Г = 300 К, молярное содержание воды <1 %, Ю-^^ см^/с [6]

Растворитель	*D*	Растворитель	*D*
Спирт:		Этилацетат	3,20
метиловый	1,75	Анилин	0,70
этиловый	1,24	н-Гексадекан	3,76
к-пропиловый	0,61	н-Бутилацетат	2,87
ызо-пропиловый	0,38	к-Масляная кисло-	0,79
н-бутиловый	0,56	та	
ызо-бутиловый	0,30	Толуол	**6,19**
бензиловый	0,37	Дихлорметан	6,53
Этиленгликоль	0,18	1,1, 1-Трихлорэтан	4,64
Триэтиленгликоль	0,19	Трихлорэтилен	**8,82**
Глицерин	0,0083	Нитробензол	**2,80**
Ацетон	4,56	Пиридин	2,73
фурфурол	0,90		

Таблица 17.15. Коэффициент диффузии различных веществ в метиловом спирте, $T = 288$ К, молярная концентрация раствора 1 %, 10-^ см^/с [7]

Растворенное вещество		Растворенное вещество	
Аллиловый спирт	1,80	мета-Нитробензальдегид	1,24
Анилин	1,49	Нитрофенол	1,38
Ацетанилид	1,50	Пиридин	1,58
Ацетилдифениламин	0,98	Салол	1,29
Ацетонитрил	2,64	2,4,6-Трибромфенол	1,12
Бензальдегид	1,66	2, 4,6-Тринитрофенол	1,32
Броманилин	1,41	2, 4,6-Трихлорфенол	1,21
Бромбензол	1,75	Уретан	1,41
Бромнитрофенол	1,43	Фенотол	1,40
3-Бромпропилен	2,22	Фенилацетат	1,62
Бромфенол	1,34	Фенол	1,40
Вэнштин	1,00	Фенолфталеин	0,78
Гидрохинон	1,25	Фурфурол	1,70
Дибензиламин	0,86	Хлоралгидрат	1,16
к-Дибромбензол	1,55	Хлоранилин	1,34
Дибромнафталин	1,33	Хлорбромметан	2,50
Динодметан	1,68	1-Хлоргидрин	1,30
Динитробензол	1,56	Хлорнитробензол	1,68
Динитронафталин	**1,32**	Хлороформ	2,07
2,4-Динитрофенол	**1,40**	Хлорфенол	1,32
1,1-Динитрогидрид	**1,36**	Четыреххлористый углерод	1,70
Дихлорнафталин	**1,52**	Этил:	
Изоамиловый спирт	1,34	бромистый	2,40
Иодбензол	1,65	иодистый	2,16
Йодоформ	1,83	Этилен:	
3-Иодпропилен	1,72	бромистый	1,95
Кислота:		иодистый	1,56
промпрогаюновая	1,35	Этилнитрат	2,20
дихлоруксусная	1,36		
иодпропионовая	**1,36**		
молочная	**1,36**		
пропионовая	**1,62**		
трибромуксусная	**1,23**		
трихлоруксусная	**1,45**		
фталевая	**1,30**		
хлорбензойная	**1,29**		
хлоруксусная	**1,52**		

Таблица 17.16. Коэффициент диффузии в различных жидкостях при бесконечном разбавлении. В случае оаствора ненулевой концентрации последняя указана в скобках, моль/л [5, 6]

растворимое вещество	растворитель	т. к	D, 10^{5}, см2/с
Ацетон	Хлороформ	**298**	2,35
		313	2,90
Бензол		288	2,51
		298	2 '89
		313	3,'55
		328	4,25
«-Бутилацетат		298	1,71
Диэтиловый эфир		**288**	2,07
		298	2,14
Иод (0,05)		283	**1,93**
Метилэтилкетон		298	**2,13**
Фенол		283	1,60
Этилацетат		298	2,02
Этиловый спирт		288	2,20

Продолжение табл. 17.16 Продолжение табл. 17.17

Анилин	
Бензойная кислота	
Бромбензол	
Винилхлорид	
Гептан	
Кислород	
Метилэтилкетон	
Муравьиная кислота	
Нафталин	
Толуол	
1,2, 4-Трихлорбензол	
Уксусная кислота	
Бензойная кислота	Ацетон
Бромоформ	
Вода	
Муравьиная кислота	
Уксусная кислота	
Бромбензол	«-Гексан
н-Гексан	
Додекан	
Метилэтилкетон	
Пропан	
Тетрахлорметан	
Толуол	
Азобензол (0,2)	Этиловый спирт
Аконикотин (0,04)	
Аллиловый спирт (1)	
Амиловый спирт	
Изоамиловый спирт	
Ацеталь (1)	
Ацетамид	
Ацетоин	
Бромнафталин №.05)	
Бромоформ	
Бруцин (0,06)	
Вода	
Гидрохинон	
Двуокись углерода	
Иод	
Иодбензол	
Камфара	
Кислород	
Мочевина	
Пиридин	
Резорцин	
Салигенин	
Стеариновая кислота **(0,2)**	
Тетрахлорметан	
Фенол (0,1)	
Хлораль (1)	
Хлороформ (1)	
Бромбензол	Уксусная кислота
Бромбензол (0,1)	
Иод (0,1)	

Продолжение табл. 17.16

Бромоформ	Эфир этиловый	3,30
Нитробензол		3.24
Фенол		3,60
а-Бромнафталин	Эфир дибензиловый	0,149
Адипиновая кислота	«-Бутиловый спирт	0,40
		1,0
Бензол		0,40
Винная кислота		0,56
Вода		0,63
Дифенил		**0,82**
н-Дихлорбензол		0,51
Масляная кислота		0,59
Метиловый спирт		0,25
Олеиновая кислота		1,02
Пропан		1,57
н-Пропиловый спирт		0,40
Ацетон	ЭтилацетаТ	3,18
Вода		3,20
Иод (0,1)		2,15
Метилэтилкетон		2,93
Нитробензол		2.25
Уксусная кислота		**2,18**
Этилбензол		1,85
Бензол		3,40
		4,40
		6,05
Иод (0,1)		
Иод (0,1)	Анизол	1,13
Бромбензол	Декалин	0,47
а-Бромнафталин		0,34
Бром	Сероуглерод	3,40
Фенол		**0,20**
Фенол	Изоаллиловый спирт	**0,20**
Бромбензол	Тетралин	0,48
а-Бромнафталин		0,36
Тетрабромэтан (0,06)	Тетрахлорэтан	0,94
Бромбензол	Толуол	1,59
Иод (0,1)		1,59
Иод (0,1)	Углерод четыреххлористый	
Бромбензол	Этилбензол	1,44

Таблица 17.17. Коэффициент диффузии веществ в расплавленных солях [7]

Диффундирующее вещество	Среда	т. к	D, 10-=см2/с
AgNOs	KNO3	630	4,56
		660	4,86
	ы й з	600	4,57
	NaNOg	630	5,06
AgBr	КВг	1050	4,92
AgCl	КС1	1000	4,63
	КС1	1050	5,10

Продолжение табл. 17.17

Диффундирующее вещество	Среда	Г. к	D, 10-" СМ2С
	KCI, LiCl	750	5,61
	KCI, LiCl	1000	6,61
Ba(KOз),	KN03	640	2,06
	NaN03	630	3,71
КВг	KNO3	630	3,01
KCI	KNO3	630	2,96
PbCU	KCI, LiCl	800	2,06
	KCI, LiCl	1000	4,40
NaNOg	KNO3	630	5,22
Sr(N03)2	KNO3	630	2,81
	NaNOg	620	4,17
ТШг	KBr	1040	4,28
TlCl	KCI, LiCl	800	3,10
	KCI	800	3,14
TINO3	KNO3	620	3,17
TINO3	Ka^KЮз	630	4,31

Таблица 17.18. Коэффициент диффузии веществ в бензоле, Ю-ь см^/с (Г = 288 К. молярная концентрация раствора 1 %) [5]

Альдегид салициловый	**1,78**	Метилсалицилат	1,56
Ацетилдифениламин	0,90	Нафталин (1%)	1,19
Бензальдегид	1,73	Нитробензол	1,84
Бром (0,1М,285К)	**2,00**	а-Нитроиафталин	1,39
Броманилин	1,41	Спирт:	
Бромбензол		изоамиловый	
а-Бромнафталин	1^30	пропиловый	
Бромнитробензол	1.33	1,2, 4, 5-Тетрахлорбензол	
Бромоформ (291К)	**1,62**	« 1 %, 281 К)	
Бромфенол	1.34	Тринитротолуол	1,39
Дексахлорбензол	1,02	2, 4, 6-Тринитро-	1,39
(< 1 %, 281 К)			
н-Дибромбензол	1.37	1,2, 4-Трихлорбензол (< 1 %, 281 К)	
Дибромнафталин	1,25		
ле/ла-Диинитробензол	1,54	1,2, 3-Трихлорпропан	1,72
Диинитронафталин	1,23	Фенантрен (1 %, 281 К)	0,95
н-Дихлорбензол	1,90	Ф (« к,	1,27
Дихлорнафталин	1,40		1,68
Иод (0,05 М,293К)	1,95	Х I лн	1,56
Иодбензол (1%, 281 К)	1.35	Х pf т	1,42
Йодоформ	1.38	***a-Xl*** зфталин	1,20
Кислота:		Хлопми эбензол	1,70
бензойная	1.36	Хлоро11)()рм	2,11
	1.37	Х I Із п	1,42
хлоруксусная	1,48	Этилен:	
		бромистый	1,97
		иодистый	1,40
		Эфир этиловый	**2,21**

Таблица 17.19. Коэффициент диффузии а металлов в амальгамах, 10"® см^/с [7]

Металл	*Т.* к	*D*	Металл	*Т.* к	D
Li	298	0,93	Zn	298	2,4
Na	298	0,86	Cd	298	2,0
K	298	0,71	Sn	298	2,1
Rb	280	0,53	Bi	298	1,5
Cs	298	0,64	Pb	298	2,1
Ag	289	1,11	Ba	281	0,60
Au	298	0,73	Sr	283	0,54
T1	298	1,18	Ca	283	0,62

Таблица 17.20. Коэффициент диффузии в расплавленных металлах [8]

Диффундирующий металл	Диффузионная среда	*Т,* к	*D,* 10-s *СМ=/С*
Mg	Al	1000	7,54
Au	Bi	800	5,22
Si	Fe	1750	2,4
Si	Fe	1830	10,8
Rh	Pb	800	3,52
Pt	Pb	760	1,95
Ag	Sn	800	4,8
Au	Sn	800	5,37
Pb	Sn	800	3,68

Таблица 17.21. Параметры выражения (17.13) для коэффициента самодиффузии металлов [8]

Металл	Температурный интервал, К	D_{0}, см2/с	*Q.* кДж/моль	Металл	Температурный интервал, К	D_{0}, СМ^С	Q, кДж/моль
Ag	700-1200	0,81	191	Cd,j.	380-490	0,10	80
Al	600—700	0,10	128	Cd, Ⅱ	380-490	0,05	76
	700—900	1,7	143	Mg,x	740—900	1.5	136
Au	900—1200	0,031	165	м|,|	740-900	1,0	135
	1100-1300	0,11	177	a-Ti	960-1100	6,4.10-8	123
Co	1050-1300	0,5	274	P-Ti	1170-2850	0,0016	146
	1300-1600	0,2	260	a - T Ы	420—560	0,4	94,5
Cu	800-1300	70	235		470-690	0,39	104
	1000-1200	120	278	a-T1, И	470—690	0,08	92
a-Fe	1200-1500	3,6	298	a-Zr	600—1000	5-10-8	92
T-Fe	1350-1600	1,1	284		900-1100	5-10-=»	218
	1700-1800	6,8	259	Э-Zr	1200—1800	0,0024	159
8-Fe	1000-1400	0,48	276	Cr	1200—1500	10-^	221
Ni	1300-1700	1,9	285		1500-1900	0,28	309
Pb	450-600	0,28	102	Hf	2070-2300	0,0012	162
Pd	1300-1800	0,20	267	Li	208-520	0,24	55,2
Pt	1500-2000	0,22	279	Mo	2000-2200	2,8	465
6-Pu	310-700	0,0045	100		2100-2600	0,3	398
0-Th	1400-1700	700	350	Na	208-520	0,2	41,9
P-Th	1700—1800	10»	417	Nb	1150—2700	1,1	402
Be,i	800-1300	0,52	158	s-Pu	800-900	0,027	77,4
Be.й	800—1300	0,62	165	Rb	208—520	0,23	39,4
Ta	1500-2400	0,12	413	W	1560-1730	6,3-10'	570
	2100-2800	2	462		2300-3000	0,54	502
a-U	850-920	0,002	168		2900-3600	43	640
p-u	970-1020	0,014	176	In,X	320—420	3,7	78,2
	1050-1300	0,002	113	In, Ⅱ	320-420	2,7	78,2
	1150-1600	0,36	308	P-Sn,X	430-500	10,7	110
	1600-2100	210	394	P-Sn, I]	430-500	7,7	107
La	930—1120		189 [10]	Cs	1100-1300	47	25,7
Pr	1100—1200	**О!Ш7 ПО]**	123 [101		1000—1200	И	23,9
Sb,j	770-900	0,10	150	K	220-330	0,16	3,92
Sb, D	770-900	56	201				

Таблица 17.22. Параметры выражения (17.13) для коэффициента самодиффузии в некоторых кристаллах

Кристалл	Ar	C (графит;	Ge	a-P белый	Xe
Т, К	78	2270-2620	1000-1200	273-303	121—158
D_{0}, СМ\С	350	10	10,8	1,1-10-5	7,3
Q, кДж /моль	17,4	680	291	39,3	34,9

Таблица 17.23. Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии малой примеси в серебре [8]

примесь	Т, к	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Fe	718-927	2,42	205
Co		104	251
Ni	750-950	21,9	230
Си	700-950	1,23	193
Zn	640-925	0,54	174
Ge		0,084	153
Ru	794-945	180	276
Pd	735-939	9,57	238
Ag	450-900	0,81	191
a	592-937	0,44	175
In	592-937	0,41	170
Sn	592-937	0,25	164
Sb	468-942	0,17	160
Au	650-950	0,26	191
Hg	650-950	0,08	160
Tl	650-800	0,15	159
Pb	700-825	0,22	160

Таблица 17.24. Параметры выражения (17.13) для диффузии малой примеси в меди [8]

примесь	Г, к	Ло, см²/с	Q, кДж/моль
Fe	719-1074	1,4	217
Co	701-1077	1,93	226
Ni	743-1076	2,7	237
Cu	500-1000	70	234
Zn	<1356	0,34	191
Ga	<1356	0,55	192
As	<1356	0,12	176
Pd	807—1056	1,71	228
Ag	<1356	0,63	195
Cd	<1356	0,93	189
Sb	600-1000	0,34	176
Au	700-1000	0,15	192
Hg	<1356	0,35	184
Tl	785—996	0,71	181

17.25. Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии малой примеси в золоте [8]

Примесь	Г, к	Оо, см²/с	Q, кДж/моль
Fe	700-950	0,082	174
Co	700-950	0,068	174
Nl	700-950	0,034	176
Ag	700-1000	0,072	168
Au	700-1050	0,091	175
Pt	800-1050	7,6	255
Hg	500-1030	0,116	157

Таблица 17.26. Параметры выражения (17.13)

Примесь	Г. к	Do. см²/с	Q, кДж/моль
Mg	1070—1250	2,3-10-6	131
	1400-1600	0,44	235
Al	1070-1250	1,1	249
	1400-1600	1,87	268
Si	1070—1250	10,6	271
	1400—1600	1,5	258
Ti	1400—1600	0,86	257
Cr	940-1170	0,03	171
	1400-1600	1,1	273
Mn	1400—1600	7,5	281
Fe	1200-1800	0,8	255
Co	1020-1460	0,75	271
	1430-1650	1,11	272
Cu	1320—1620	0,57	258
Mo	1400-1600	3	288
W	1400-1600	11,1	322
Au	1200-1400	2	272

Таблица 17.27. Параметры выражения (17.13) для диффузии различных примесей в металлах III и IV групп. В скобках указаны индексы Миллера, характе изующие направление диффузноиного потока [10]

Металл	Примесь	диапазон температур, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Pb	Cu	>500	7,9-10-3	33,5
	Ag	>400	4,6-10-2	60,3
		390-570	7,5-10-2	63,6
	Au	460-570	4,1-10-3	39,1
		460-600	8,7-10-3	41,9
	Zn	450-570	1,6-10-2	47,3
	Cd	>420	0,41	
	Hg	470—570	1,05	95'
	Tl	480-600	0,5	104
	Sn	510-560	0,16	96.5
	Na	520-490	6,3	119
	Ni	480-870	9,4-10-3	44,4
	Pd	480-860	3,8-10-3	36
Sn	Cu	410—500	2,4-10-3	33,1
	Au [001]	400-510	5,8-10-3	46
	[1001	400-510	0,16	74,1
	Ag [001]	400—510	7,1-10-3	51,5
	[100]	400-510	0,18	77
	Zn	360—510	5,9-10-3	49,4
	Cd [001]	460-500	220	118
	[100]	460-500	120	113
	Hg [001]	450—500	7,5	106
	[110]	450-500	30	112
	In [001]	450—500	12	107
	In [100]	450—500	34	108
	Sb [001]	470-500	79	122
	[100]	470—500	77	123
In	Au	300-420	9-10-3	281
		300—420	0,11	48,2
Tl		360-500	0,033	48,2
	Au	390-500	5,3-10-^	21,8
p-Al	Na+	470-670	2-10-^	15,9
	ЙГ	470-670	1,65- 10-*	16,8
		470—670	0,78- 10-«	22,4
	Rb+	470—670	0,34-10-*	30,1
	Li+	470—670	14,5- 10-*	36,4
	Tl+	470—670	0,65- 10-*	34,4

Таблица 17.28. Параметры выражения (17.13) для диффузии атомов примесей в щелочных металлах [10]

Металл	Примесь	Диапазон температур, *K*	Do. СМ\С	*Q.* кДж/моль
Li	Си	320-450	0,47	38,6
	Ag	340—430	0,12	52,8
	Au	320—420	0,21	46,1
	Zn	330-450	0,57	54,5
	Na	330-450	0,41	52,8
K	Au	280-326	1300	12,4
Na	Au	270-350	3,3	9,2

Таблица 17.29. Параметры выражения (17.13) для диффузии атомов примеси в лантаиидах и актинидах [10]

Металл	примесь	Интервал температур, К	*Do, СМ»/С*	Q. кДж/моль
La	Au	980—1070	0,022	75,8
Pr	Cu	930-1060	0,084	75,8
		1090-1190	0,057	74,5
	Co	880-1040	0,047	68,7
	Au	880-1020	0,043	82,5
		1070-1180	0,033	84,1
	Ag	880-1040	0,14	106
		1070—1190	0,032	90,0
	Zn	880-1040	0,18	104
		1100-1200	0,63	113
.-0	Co	1050—1350	3,5.10-*	52,8
	Fe	1050-1350	2,7-10-*	50,2
	Ni	1050-1350	5,4-10-«	65,8
	Mn	1050—1350	1,8-10-4	58,2
	Cr	1050-1350	5,4-10-3	103
	Cu	1050-1350	2-10-3	101
	Nb	1050—1350	0,049	166

Таблица 17.30. Параметры температурной зависимости коэффициента диффузии малой примеси в р-Ti [8]

$$D = D_{0i} \exp(-Q/RT) + D_{\infty} \exp(-Q/RT)^{*}$$

ů *ř.* *C*	*T. K*		1	*-ж* *Ъ* *ik*	1 J
Ti	1170-1800	2	125	1,0	250
p	1220-1900	36,2	101	5	237
Sc	1200-1560	21	137	34	
V	1200—1820	10	146	3,4	258
Cr	1220-1900	74	154	14	274
Mn	1200-1900	76	144	12	270
Fe	1200-1900	80	126	15	254
Co	1200-1900	130	130	16	257
Ni	1200-1900	170	133	20	252
Nb	1270-1900	13	146	9,5	291
Mo	1170-1900	7	155	3,6	272
Sn	1230-1870	3,8	132	9,5	291
Ta	1300-1900	7,2	151	50	335

*** При низких температурах** преобладает первый член выражения, **при высоких — второй.**

Таблица 17.31. Параметры выражения (17.10) для коэффициента взаимной диффузии металлов и сплавов. Прочерки означают, что концентрация примеси исчезающе мала [1]

	Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Атомная концентрация диффундирующего элемента, %	*T.* K	Do, СМ\С	*Q.* кДж/моль
i:	Ag	Al	1,26	740-850	1,1	137
		Au	9	1120—1270	2,9-10-2	159
		Cu	3	1000—1070	2,9-10-2	156
		Pb	0,12	500-560	7,4-10-2	64
*'	Al	Cu	15-21	770—1120	7,1-10-2	164
	Au	Ag	100	500-870	5,3-10-*	125
			18,4	1040-1200	1,1-10-*	112
		Cu	2,4—3,5	670-1250	6,8.10-e	94
		Pb	0,03-0,09	370-570	0,35	59,5
	в	a-Fe		<1800		260
	Bi	Pb	2,0	500-560	1,8-10-3	77
t	C	Fe	Карбонизация	1100-1400	1,67-10-2	120
4			1,1 мае. %	1200-1500	0,49	153
i			0.1-1 мае. %	1000—1500	0,12	137
J		a-Fe	–	<1800	7,9-10-3	76
				<1800	2-10 2	84
i	cd	Ag	2,0	920-1170	4,9-10-6	94

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

Диффунди-рующий элемент	Диффузионная среда	Атомная концентрация диффундирующего элемента, %	*т.* к	D., CMVC	Q, кДж/моль
			<1200	0,44	175
	Си	3	1000-1130	3,04.10-*	99
	Pb	1,6	440-520	1,83-10-3	65
Co	a-Fe		<1800	0,4	226
	7-Fe		<1800	1,2-10^	435
	Сталь		<1800	90	335
Cr	a-Fe		<1800	3-10*	343
	7-Fe		<1800	1,8.10«	406
	Сталь		<1800	10	314
Cs	W	J-й адсорбционный слой	300-700	0,2	58,6
		2-й адсорбционный слон	300—700	1,64-10-2	96
Си	^	2,0	920-1170	5,9 . 10-6	104
		Эвтектика	700—800	2,3	146
		0,085-0,17	730-840	8,4-10-'"	137
	Au	100	570-890	1,06-10-3	115
		25,6	700-1000	5,8-10-«	115
	Ge		<1200	1,9.10-*	172
	Pt	13,9	1310—1730	4,8-10-2	233
	р-латунь (45 % Zn)		<1100	3,8-10-2	104
Fe	Au	18,3	1030-1280	1,16-10-*	102
	Fe-20 %	—	<1800	18-	314 [C]
	Ni-C	—	<1800		314 [C]
	Ni		<1800	8,4-10-3	214
	W	0,04	2200-2800	11,5	586
Ge	Ge	Самодиффузия	<1200	87	308
Hg	Cd	4	430-475	2,6	82
In	Ag	20	920-1170	7,3-10-5	102
Li	GI		<1200	2,5-10-3	49,4
	Si		<1700	2,3-10-3	63,6
Mg	Al	Эвтектика	640-710	1,5-10-2	161
		5,5-11,0	670-850	0,1.10-1	119
Mn	Cu	8-11,4	'670-1120	7,2.10-«	96
Mo	W	Монокристалл	1800-2530	6,3-10-*	33 7
		Поликристалл	1800-2530	5-10-3	33^7
N	Fe	–	<1800	3,1-10-3	75
			<1800	3-10-**3**	76
			<1800	6,6-10-3	78
	Th		<1970	2,Ы0-з	94
	a-Ti		<1940	1,2-10-2	190
	^Ti		<1940	0,35	142
Ni	Au	15,0	1070-1280	1,74-10-3	131
	Cu	7,5—**11,8**	820-1220	6,5-10-i^	125
	Pt	14,9	1320—1670	7,8-10-*	181
O	p-Ti	"	<1940	1,6	202
Pd	Ag	20,2	720—1200	6,4-10-8	84,5
	Au	17,1	1000—1250	1,13-10-3	91,5
	Cu	4,3-6,2	760-1240	1,6-10-«	163
Pt	Au	20,1	1000-1250	1,24-10-3	163
	Cu	2,4-3,5	760—1230	1,0-10-«	91,5
Sb	Ag	2,0	920—1170	5,3-10-6	91
Si	Al	0,5	740-870	0,9	128
Sn	Ag	20	920-1170	7,8-10-е	89,5
	Cu	3,9-5,6	670—1120	4,1-10-3	131
	Pb	2,0	510-560	4,0	110
	W	Диффузия на границе между зернами	2050-2500	1,13	394
		Объемная диффузия	2400	1,0	503
		Поверхностная диффузия	1650	0,47	278
Tl	Pb	2,0	500-550	2,5-10-2	81
и	*w*		2000	1,14	420

Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Атомная концентрация диффундирующего элемента, %	T, K	D_0, см^/с	Q, кДж/моль
W	a-Fe		<1800	380	293
	7-FP		<1800	103	377
	Сталь		<1800	13	314
Y	W		2000	0,11	260
Zn	Zn	**Самодиффузия в Zn чистотой**	<690	0,22	60
		Самодиффузия в Zn чистотой 99,99 Уо	<690	0,38	61
	Al	**0,84**	690-730	12	116
	Си	**6,8-9,7**	630-1150	3-10-fi	82,5
		3	1000-1130	3,7-10-8	92
		0-28,6	910-1150	3,2-10-3	176
	р-латунь (45 % Zn)		<1100	0.024	95,5
Zr	**W**	–	2000	1,1	326

• **[С] —атомная концентрация углерода, %.**

Таблица 17.32. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии ионов в кристаллах солей [10]

Ион	Соль	Диапазон температур. К	Do. см^/с	Q, кДж/моль
Li+	LiF	850-1000	0,8	192
		1000-1100	5,6	289
Na+	NaCl	550-820	3,5-ю-''	81,2
		860—1070	76,9	196
Na^	NaBr	770-950	0,67	147
Г	KF	870—1100	2	172
	KCI	800-950	137	207
		860-1020	1,8-10-!^	76
Г	KBr	730-1000	0,01	122
	KI	730-950	10-5	62
Rb+	RbCI	840-970	33,3	193
	CsCl	630-730	1,1	130
		760-880	0,1	134
Cs+	Csl	570-770	80	158
ci-	NaCI	770-1020	60,7	206
Rr-	NaBr	920—1020	1,0	164
ci-	KCl	770—1010	178	216
Br-	KBr	670—970	10-3	196
I-	KI	730-950	1,2-10-3	108
Ci-	RbCI	870-970	33,3	193
Cl-	CsCl	550-730	1,51	122
		760—880	0,7	152
I-	Csl	680-830	0,39	122

Таблица 17.33. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии примесей в кристаллах солей [10]

Кристалл	месь"	Диапазон температур. К	D_0, см2/с	Q, кДж/моль
NaF	Li	850-1000	0,8	192'
		1000-1100	5,6	290
NaCl	K	670-930	–	48,3

Продолжение табл. 17.33

Кристалл	Примесь	Диапазон температур. К	D_0, см2/с	Q, кДж/моль
	Rb	870—1020	28,5	192
	Cs	870-970	1,62	192
	Cu	620-920	33,8	138
	Ag	850-1000	380	192
	Br	770-920	20	187
	I	800—970	500	216
	Ca	700—1020	6-10-«	87
	Sr	390—1070	1,7-10-3	126
	Cd	800-930	3,9-10-3	251
	Mn	670-970	10-*	65
	Zn	810-1000	0,04	94,5
	Pb	600-800	0,015	94,5
	Co	880-1030	8-10-3	106
	Ni	900-1020	0,02	125
	Hg	720-820	8,2-10-5	55
	Au	–	0,2	103
Nal	Tl	670—910	5-10-3	113
KBr	T1	410—480	0,091	96,5
		620—770	50	192
	Pb	550-670	**1,5**-10-**3**	87,5
KCI	Li	770—1000	20	142
	Na	860-1020	2,2	169
KCI	Rb	880-1040	26,8	195
	Cs	840-1020	0,7	169
	Tl	500-730	5,8-10-"	23
		730-1000	1,3-10-3	126
	Cu	620-920	10,6	118
	Ag	470—920		40,6
	I	770—920	50	193
	OH	670-890	1,2-103	193
	Cl	770—920	1,5-10-3	109
	Cd	620-770	4,7-10-=	52,5
	Pb	500-750	10-3	96,5
	Eu	700-820	0,064	124
	Co	470-920		19,3
	Bi	670—950	5,6-10-3	94
	Ce	770-970	1,1-10-**3**	100

Таблица 17.34. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии иона Ag+ в кристаллах [1]

Диффузионная среда	*Т, к*	Do, CMVc	Q, кдж/моль
a-AgI	454-744		9,45
a-CuI	685-753	4,5-10-3	28,3
a-Cu^S	586-1192	3,3.10-«	19,1
a-Cuale	603-794	2,4	87
a-AgI	451-701	**1,6.io-«**	9,45
a-AgjS	443—693	4,6-10-«	13,3
a-Ag,Se	421-673	1,6-10-^	12,3
a-AgaTe	428—678	3,8-10-6	11,1
a-Agal	473-653	5,8-10-3	19,1
NaCl	<550	**1,6**	75
	>550	3,1	174
PbCL	439—743	7,7	154
PЫ,	387-438	7,8	126
	528—588	10,6	127
PbS	**733—1043**	1,3	176
NaBr		50	199
<x-Ag,Se		6,7-**10-***	85,5

Таблица 17.35. Коэффициент диффузии ионов в кристаллах при различных температурах [1]

Диффундирующий ион	Диффузионная среда	*Т,* к	Q, 10-« cmVC
Ag^	CuBr	5-18	51
	c<-Cu,S	503	1,85
		603	4,6
		693	9,4
	a-CuaTe	603	
		749	1,98
		794	4,66
	CUgSb	***723***	0,139
Li*	AgCl	511	0,24
	a-AgI	753	37-41
	a-Ag,S	443	0,4
		503	4,1
		603	6,3
		693	16,5
Na*	AgCl	723	0,116
	AgBr	573	0,023
Pb++	PbCJ2	473	4,5
		523	11
		578	15
		653	23
Pb*^	PЫг	387	7,3-10-"
		420	1,35-10-9
		438	7,35-10-"
a -	AgI	453	i,i-io-«
Se^-	Cu,S	844	1,1-10-3
		967	4,9-10-3

Таблица 17.36. Коэффициент взаимной диффузии твердых солей [1]

Диффундирующее вещество	Диффузионная среда	Г. к	D, 10-и CM'/o
Ag (ИЗ AgNOs)	Na-стекло	627	25,2
	Na-пермутит	627	14,8
AgiSn	CU4Sn	723	231
BaMoOi	BaWOi	1223	9,61
BaW04	BaMoOa	1223	3,47
MgMoO.	MgWOi	1073	2,31
		1073	1,39
s § i		1223	9,14
SrWOi	SrMoO.	1223	3,01
ZnMo04	ZnWOj	1073	3,94
		1123	6,36
ZnW04	ZnMo04	1073	1,00
		1123	2,89

Таблица 17.37. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии газов в твердых телах [1]

Диффундирующий газ	Диффузионная среда	*m, к*	Do, 10-" CMSc	Q, кДж/моль
На	**SiOa**	473	8,5	42,7
		773	**И**	42,7
Не	**SiOa**	293	5,7	23
		773	2,9	23
	Пирекс	293	1,3	36,4
NH3	Анальцим*	773	5,5	—

Таблица 17.38. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии атомов водорода и его изотопов в металлах Г9]

Атом	Металл	Г, к	$D_{„}$, CMVC	Q, кДж/моль
и	Pd	<900	2,9.10-3	22,2
и	Ni	>631	6,9-10-3	40,5
		<631	4,8-10-3	39,4
и	a-Fe	<1800	7,5-10-*	10
и	Nb	>273	5,0-10-«	10,2
		<223	0,9-10-*	6,5
D	Nb	<1000	5,2-10-«	12,3
т	Nb	<1000	4,5.10-«	13
и	Ta	>273	4,4-10-*	13,5
		<200	2-10-8	3,85
D	Ta	<600	4,6-10-*	15,5
и	V	<600	3,1-10-*	4,36
D	V	<600	3,8-10-*	7,12
И	Си	600-1100	3,5-10-*	39,5
D	Си	800-1100	2,5-10-*	39,2
Т	Си	800—1100	2-10-*	39,2

Таблица 17.39. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии атомов инертных газов в кристаллах солей [10]

Кристалл	Газ	Диапазон температур, К	D_0, $см^2/с$	Q, кДж/моль
KCl	ат	>670	7,9-10-^	36,7
	Kr	450-520	8-10-!^	107
		520-770	108	203
KBr	Ar	290—570	108	145
	Xe	290-570	10	135
KI	Xe	420—770	1,5	98
RbF	Kr	570—1000	2,5	132
RbCl	Kr	630-970	7,9-10«	43
RbBr	Kr	460-600	4-10'	163
		>600	5-10-^	28,9
RbI	Kr	450-610	1,3-108	136
		>610	1,6-10-3	29,4
	Xe	420-770	0,082	89,5
CsF	Xe	720-870	10^	19,3
CsCl	Xe	620-740	0,1	86,6
		740—920	0,1	83,5
CsBr	Xe	530-850	100	140
CsI	Xe	420-770	0,57	96

Таблица 17.40. Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии атомов примеси в полупроводниках [11]

Полупроводник	Диффундирующее вещество	D_0, $см^2/с$	Q, кДж/моль	Диапазон температур, К
Ge	Li	0,0012	49,2	900-1200
	Си	0,0033	17,4	900—1200
	Ag	0,044	96,5	900-1200
	Au	0,055	242	1000—1200
	Zn	3,3	247	900-1200
	B	0,084	444	1000-1200
	Ga	20	320	1000-1200
	Al	0,05	261	1000-1200
	In	0,048	231	1000-1200
	Ge	49	209	1000-1200
	Sn	0,017	183	1000—1200
	Pb	–	348	1000—1200
	P	1,3	240	1000—1200
	As	4,5	232	900—1200
	Sb	3,6	232	1000-1200
	Fe	0,13	106	1000—1200
	Ni	0,42	87	900-1200
	O	0,17	195	900-1200
	He	0,0061	68	900-1200
	H	0,0027	36,7	1000-1200
	Ta	2,5-10-8	112	900-1200
	Be	0,5	242	900-1200
	Co	0,16	106	900-1200
	N	–	249	900-1200
	Bi		234	900-1200

Продолжение табл.17.49

Полупроводник	Диффундирующее вещество	D_0, $см^2/с$	Q, кДж/моль	Диапазон температур, К
Si	и	0,0094	46,3	1240—1480
	Li	0,0025	63,6	300-400
		0,0023	62,7	700—1100
	Си	0,0047	41,5	670-970
		0,4	96,5	1100—1400
	Ag	0,002	154	1400—1600
	Au	0,0011	106	1100-1500
	Na	0,0016	69	800—1100
	K	0,0011	72,5	800—1060
	Zn	0,1	135	1250-1550
	B	6-10-'	163	1000—1400
	Al	4,8	323	1400—1700
	Ga	90	376	1300—1POO
	1и	18	374	1300—1POO
	Te	16,5	375	1300—1POO
	C	0,33	282	1350—1700
	Si	5,4-103	483	1400-1700
	Ge	6,3-10=	510	1400—1700
	P	20	364	1300—1600
	As	34	376	1300-1600
	Sb	9,2	380	1300-1P00
	Bi	103	444	1300-1600
	o	0,21	292	1300-1600
	s	0,92	212	1300-1600
	Cr	0,01	96,5	1200-1500
	Fe	0,0062	83	1300-1600
	He	0,11	121	1300—1600
Te	T1	320	172	630-700
	Se	260	120	590—700
	Hg	3,4-10-=	78	640-700
	Te	3,5-10-^	96,5	600-700
Se	Fe	10-=	37,5	490
	Zn	3,8-10-'	28	490
	S	4,9	26	490
	Ge	9,4-10-«	38,6	490
	Te	5,4-10-8	39,6	490
	Se	2,8-10-8	28	490
	T1	1,4-10-e	33,8	490
	Sn	4,8-10-8	37,6	490
	In	5,2-10-8	30,9	490
AlSb	Al	—	174	
	Sb	–	145	
	Zn	0,33	186	930-1130
	Cu	0,0035	34,5	420-770
InAs	In	6-10=	386	1000-1200
	As	3-10'	432	1000-1200
	Cu	0,036	51	1200
		7,3-10-^	25	730-1200
	Au	0,0058	62,8	900-1200
	Mg	2-10-8	113	i<00—1200
	Zn	0,0037	104	900-1200
	C(l	6-io-«	112	900-1200
	Ge	3,7-10-8	113	900-1200
	Sn	1,5-10-8	113	900-1200
	S	W	212	900-1200
	Se		212	900-1200
	Te	3,4-10-=	124	900-1200
	P	130	261	920-1170

Продолжение табл. 17.16

Полупроводник	Диффундирующее вещество	Do. СМ^с	Q. кДж/моль	Диапазон температур, К
GaSb	Ga	3200	304	930—970
	Sb	0,0087	109	600-920
	Sb	34000	333	920—970
	Sn	2,4.10-5	77,4	600—920
	Te	3,8.10-^	116	600—920
	Cd	1,5.10-е	69,5	770-900
	Li	2,3-10-^	184	1070
InP	In		373	1120—1270
	P	7-101"	545	1120-1270
	Au	1,3-10-is	463	870-1100
	Ag	3,6-10-^	57	800-1200
	Cu	30	66,5	900-1200
	Cd	1,1-10-'	70	1000-1200
InSb	In	2-10-s	27	600-800
	Sb	1,4-10-«	363	600-800
	Cu	3,5-10-5	35,7	500-760
	Ag	10-'	24,2	700-800
	Au	7-10-«	30,9	400-800
	Li	7-10-^	27	770
	Hg	4-10-е	113	700—770
	Cd	10-5	106	520—770
	Zn	1,6-10"	222	620—770
	Sn	1,3-10-«	62,7	570—770
	Ge	5-10-Ч	91,5	600-770
	S	4-105	101	470—720
	Se	0,016	125	470—720
	Co	2,7-10"	37,7	770-770
	Fe	10-'	24,2	700-780
	Te	6,6-10-6	115	630-770
Gap	S	3200	453	1400-1700
GaAs	Ga	10'	540	1400—1500
	As	4-10«	980	1400-1500
	Li	0,53	96,5	520-770
	Au	10-3	106	860—1330
	Mg	4-10-6	118	1070-1270
	Cd	0,0013	212	1070-1370
	Zn	3-10-'	96,5	1070-1370
	Ge	7,5	348	1320—1410
	Sn	6-10*	241	1300—1500
	S	180	251	1100-1500
	Mn	0,65	240	1000—1300
	Te	2,6-10-5	193	1270—1370
CdS	Cd	3	193	1000—1420
	Cd	1,1-10-5	60	670—1000
	Cu	2000	92,7	420—670
	Cu	0,0015	73,4	670—1020
	Ag	0,24	77,2	570-770
	Au	200	174	770—1070
	Li	з-ю-в	65,6	880—1230

Продолжение табл. 17.17

Полупровод-	Диффундирующее вещество	Do. СМ^С	0,кДж/МОЛЬ	Диапазон температур, К
CdSe	Se	1,3-105	42,8	1220-1700
	P	—	203	1070-1270
CdTe	Se	1,7-10-4	130	950-1200
	In	0,041	154	720-1300
	Au	67	193	600-1000
	Cu	3,7-10-4	64,7	370-570
ZnS	Zn	3-10-^	147	1170-1200
	Zn	1,5-10-«	314	1210-1300
	S	—	328	970-1160
ZnSe	Zn	1000	332	1000-1100
	Cu	1,7-10-5	64	470—840
ZnTe	Zn	0,01	183	1060-1220
	Te	2-10-4	367	1000-1270
HgTe	Cd	3,1-10-4	66,7	520-620

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник химика. М.: Xhmhhw 1964. Т. 3.
2. Marrero T. A., Mason E. A.//J. Phys. Chem. R Data. 1972. Vol. 1. P. 3—76.
3. Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизованной плазме. М.: Атомиздат. 1975.
4. Крюков Н. А. Взаимодействие атомов ртути с атомами инертных газов. Автореф. дне. ...канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛГУ 1984.
5. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Пер. с англ. Л.: Химия. 1971.
6. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей- Пер. с англ. Л.: Химия. 1982.
7. Бретшнейдер С. Свойства газов и жидкостей: Пер. с польск. М.: Химия. 1986.
8. Adda Y., Philibert J. La diffusion dans les solids. Paris: Press Universitaires de France, 1966. Vol. 2.
9. Алефельд Г. Фёлькль И.//Водород в металлах/Под ред. Г. Алефельда и И Фёлькля: Пер. с англ. М.: Мир. 1981.
10. Warburton W. K-, Turnbull D.//Diffusion in Solids. Amsterdam: North Holland. 1975.
11. Болтакс Б. И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Л.: Наука. 1972.

ГЛАВА 18

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ

А. В. Елецкий

18.1. КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ МОЛЕКУЛ В ГАЗАХ

Процесс, в результате которого энергия молекулярных колебаний превращается в энергию поступательного движения частиц, описывается формулой

$$\mathbf{ABio) + M \text{->-} AB(ti') + M + Д£.} \qquad \mathbf{(18.1)}$$

где АВ—молекула; v, и'— колебательные квантовые числа; М-—частица газа (атом, молекула), А£ — энергия, выделяющаяся в виде поступательного движения сталкивающихся частиц. При колебательной релаксации наиболее эффективно протекают процессы, сопровождающиеся изменением колебательного квантового числа на единицу (tJ—y'=1)1Ч. Именно такие процессы наиболее подробно изучены экспериментально. В табл. 18.1 представлены значения константы k скорости колебательной релаксации двухатомных молекул, которые измерены при различных температурах для молекул, находящихся в первом колебательно-возбужденном состоянии (& = 1, в'=0). Погрешность приведенных данных составляет несколько сотен процентов. В табл. 18.2, 18.3 приведены значения константы скорости колебательной релаксации молекул при различных температурах и значениях колебательного квантового числа ***v.*** Параметры процессов колебательной релаксации и обмена колебательными квантами молекулы CO приведены на рис. 18.1 и 18.2.

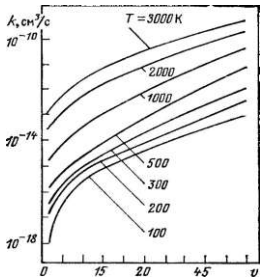


Рис. 18.1 Зависимость константы скорости колебательной релаксации молекулы CO при столкновении с атомом Не от колебательного квантового числа молекулы CO (t;)-fHe ->CO (r;—l)-fHe-fA£[3]

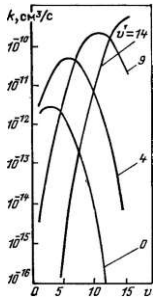


Рис. 18.2. Зависимость константы скорости обмена колебательными квантами при столкновении между молекулами CO [CO(r;)-[-CO(r;')—^—^CO(r;—1)-fCO(i:)'-f-l)] от колебательного квантового числа *V* молекулы (7=300 К)

Таблица 18.1. Константа скорости колебательной релаксации двухатомных молекул, находящихся в первом колебательно-возбужденном состоянии, к, 10-W смз/с [1, 2]

Молекула АВ	привесь	Температура, К		
		300	800	2000
Нз	На	0,8 0,3 [5]		
&		1,3	0,56	l4
		0,18		97
NO	N0	640		4,7-10^
О.	Оа	0,06	11	260

Продолжение табл. 18.28

Примесь М	Температура, К		
I	18		
		3500	
	1150		
	1,7-10»		8,2-10^
HCl	180	1000	10»
HBr	170	800	10»
HI		1000	10»
DF	1,1 • 10»		
DCl	63		
CS	3400		
	2,7		
й ь	1,4		
DF			
He			1300
Ar			250
F			4,2-105.
H.			500
		2600	
а		1200	
DF	1,8.10»	1,2-10»	10»
H	3.6-10»		
	55		
Й	0,03		
	4,4		
Ко	23		
	2600		
	7-10»		
He	5,5-10»		
Ne	4,4-10»		
Kr	4,2-10»		
H	7.7-10»		
D	1,1-10^		
C1,			
He	4.5-10»		
HD	80		
Ne	4,8-10»		
DF	2800		
Kr	4,7-10»		
Br	2.6-10»		
H^	100		
	110		
Da			
		–	120
Ar	230	–	1200
	180	1200	8200
й-	10»		1,7-105
HF	6400		
D,			
He	0,62	–	–
C1	5,5-10»		
	190	–	–
й ь	780		
Br	2300		
	17		
	1,8-10»		
D	2-10» .	–	

Продолжение табл. 18.29

Молекула АВ	При^мес.	Температура, к		
		300	800	2000
На	HF	8300		
	Не*2	0,2		2000
	Ar	0,1		–
	D2	0,24		
CO	***He***	0,27 [5]	2,1 [5J	300 [5]
	И		—	2,7-10®
	Ne	0,009	—	5,3
		4,0 [4]	—	Z
		1,9 [5]		
	D.	0, 12 [5]	—	—
	O2	0,4	—	—
	O	3600	5800	5-10»
NO	Ar	85		
	CO	340	—	—
	N2	10,3	—	—
	He	2600	—	—
CI2	He	10»		—
	Ha	1,9-10»		—
	N2	70		—
N,	O	45	360	2500
	He	14	–	—
	Ha	150	—	—
	Or	12	—	—
	He	0,07	–	—
	Ha	2,8	—	—
O2	He	<20 [6]	–	–
	Ne	<130 [6]	–	—
	Ar	10» [6]	—	—
	Kr	1,1-105 [6]	—	—
	H2	2,5-10» [6]		—
	D2	6500 [6]		—
	&	1,9-10» [6]	–	**Z**
	O.	4,4-105[6]		
		3-10Ч6]		

fe = o.oii-icr" Vc при 77 К [5];
i ft = 0,017-icr>e э/с при 77 К [1,2]
' й = 0,18-10-» CMV/c при 77 К [4].

Таблица 18.2. Константа скорости колебательной релаксации молекул HF (DF) при столкновении с невозбужденными молекулами HF (DF) к, 1Q-i^ см^/с [9, 10]

	Т, К				
	300	500	1000	1800	2400
	HF (г;) + HF (0) ^ HF (у — 1) + HF (0)				
I	1,5	1,2	0,88	0,57	0,88
2	7,4	6,2	4,6	2,9	4,6
3	16	13	8,8	5,6	8,8
4	23	21	15	9,4	14
5	34	28	20	12	19
6	41	32	24	14	24

Продолжение табл. 17.16 *Продолжение табл. 17.17*

	300	500	1000	1800	2400
	DF M-l- DF (0) . DF (v - 1) + DF (0)				
1	1,0	0,56	0,42	0,74	1,34
2	4,4	2,3	1,9	3,2	5,4
3	9,3	4,8	4,1	6,7	11
4	13	7,7	6,2	10	17
5	18	10,3	7,5	13	21
6	21	12	8,8	15	27
	DF (r;) + HP (0) • DF (t) ~ 1) + HF (0)				
1	1,1	0,73	0,72	0,52	0,63
2	4,5	3,1	2,5	2,2	3,0
3	11	7,3	4,9	4,4	6,1
4	16	11	7,3	8	9,3
5	22	16	11	10	12
6	25	18	14	12	13
	HF(t;) + DF(0) ^ HF (t) — 1) + DF (0)				
1	1,8	1,4	0,95	0,97	1,0
2	8,3	6,9	4,6	4,4	4,5
3	18	14	9,4	9,6	10
4	30	24	15	14	16
5	41	31	21	20	21
6	53	37	25	22	22

Таблица 18.3. Константа скорости колебательной релаксации двухатомных молекул, находящихся в различных колебательно-возбужденных состояниях *k*, см3/с (Г = 300 К) (1. 2]

Молекула AB	Примесь	T						
		>	2	3	4	5	6	7
HCl		50	85	no			130	
		8,3	14,2	18,3	—	—	70	—
		0,28	1,4	—	—	—	—	—
	H.	0,0044	0,0088	0,014	0,019	—	—	—
HF	O.	0,0011	0,0074	0,02	0,05	0,14	0,34	0,5
	N.	0,0046	0,026	0,08	0,14	0,57	1,7	3,7
	D^	0,09	0,57	1,4	3	5,7	8	12
	CO_2	1,1	5,7	10	20	30	43	43
	HA	0,68	0,21	0,15	0,21	0,49	0,99	0,16
DF	*B,*	0,18	0,06	0,14	0,29	—	—	—
	N.	0,023	0,074	0,17	0,3			—

18.2. РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА АТОМАХ И МОЛЕКУЛАХ

Таблица 18.4. Транспортное сечение рассеяния электронов иа атомах и молекулах, 10-^® см^ [27]

Энергия электрона, эВ	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H.		D.	OB	CO,	CSJ	H.O
0,01	5,2		5,7	25	120	7,3	2,2	7,3	3,0	170	7,8	4000
0,02	5,4		4,0	20	80	8,0	2,9	8,0	3,0	120	5,9	1700
0,04	5,5	0,50	2,4	14	50	9,0	3,9	9,0	3,0	85	5,2	790
0,06	5,7	0,57	1,5	10	37	9,6	4,6	9,6	3,0		6,0	500
0,08	5,8	0,64	0,8	8	28	10,1	5,2	10,1	3,4			350
0,1	5,9	0,70	0,4	6,9	21	10,5	6,0	10,6	4,4	52		
0,20	6,2	0,93	0,17	3,0	8,2	12,0	8,3	12	4,9	34	10,0	
0,30	6,4	1,09	0,16	1,0	4,0	13,0	9,6	14	4,6	18	12	
0,40	6,5	1,22	0,18	0,6	1,9	13,9	10	14,5	4,7		13,5	
0,50	6,6	1,32	0,22	0,56	1,4	14,7	10	15	5,1	7,3	14	
0,60	6,7	1,40	0,4	0,52	1,3	15,6	10	16	5,5	5,7	15	
0,70	6,7	1,47	0,54	0,54	1,4	16,3	10	17	6,1	5,0	15,5	
0,80	6,8	1,53	0,77	0,56	1,5	17	10	17,5	6,8		16	
1,0	6,8	1,62	1,0	0,60	2,1	18	10,5	18	7,6	4,1	17,0	
2,0	7,0	1,82	2,6	2,0	8,0	18,0	20	?	7,1	4,8		
2,5	7,0	1,86	—			17	32		6,3	6,4		
3,0	6,9	1,91	4,0	4,0	15	16	30		5,6	10,4	—	
4,0	6,6	1,98	5,9	7,0	23	14	13	—	5,2	17,1		
5,0	6,3	2,07	7,9	10,0	32	13	11	—	5,4	14		—
6,0	6,0	2,14	9,0	13	34		10		5,8			
7,0		2,21	10,6	16	35		9,7					
8,0	—		11	18	35		9,6		7,2	11,7		—
9,0	—	—	12	19	33		9,5					
10	—		14	21	32		9,8		8,4	12,9		
15	—	-	12	22	80		11		9,4			
20			10	19	22		13		9,1			

Таблица 18.5. Сечения пеннинговского процесса A^ + B^ A + B^ + e при тепловой энергии, Ю"" ск^ (данные являются результатом усреднения по многочисленным измерениям, погрешность данных 50 — 100%) |11, 13]

H							
Ar		3,1					
Kr		1					
Xe		12					
Hg							
He(23S)							
Na							
Zn							
Cd							
	2,7						
	11						
	25	1,7	2,8	2,8	1,9	1,8	2,2
8o	16	7					
NO	36	21					
	70	11					
i?:	53						
Ne							
Cs	22						
N,0	38						
Li							
Rb							

Таблица 18.6. Среднее сечение (усреднено ассоциативной ионизации при столкновении с участием возбужденных атомов A* + B ^ AB+ + e [11, 13]

A*		т. к	Константа	Среднее сечение, см'
Li (2 V)	Li(2Ф)	900	—	0,005
Na (3^P)	Na (3 2P)	500	380	3,8
K(4 2P)	K (4 2P)	500	9	0,13
Rb *(5^P)*	Rb (5 гр)	470	3,2	0,7
Cs (6	Cs (6 2P)	425	2	0,54
He (3=15)	He	320	—	0,07
He(3зр)	He	320	-	1,7
He (3^O)	He	320	—	3,2
He (3iP)	He	320	—	2,1
He (3 *W)*	He	320	—	17
Rb (6 2P)	Rb	475	16 000	-
Rb(8 2p)	Rb	520	3000	—
Rb(9ap)	Rb	520	6600	—
Rb (Ювр)	Rb	520	9400	—

Продолжение табл. 18.6

A*	в	т. к	Константа скорости,	Среднее сечение, 10-» CMS
Cs(7 V)	Cs	425	1100	—
Cs(8 2P)	**Cs**	**470**	**13**	
Cs (9V)	Cs	500	4600	-
Cs(10 2P)	Cs	500	6800	—
K(6 2P)	K	570	3000	—
K(7^P)	**K**	570	45 ООО	—
K{8 2P)	**K**	570	74 000	—
K (9 2P)	**к**	570	75 ООО	—
и	**o**	2000	—	16,2
и	Oa	2000	—	0,17
и	Oз	2000	—	4
Th	O	2000	-	10,3
Th	**o.**	2000	-	0,15
Th	Oз	2000	—	2000
Hg (6^-Po)	Hg	400	—	460

18.3. ПРОЦЕССЫ ИОНИЗАЦИИ С УЧАСТИЕМ ВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМОВ

При столкновении возбужденного атома с другим атомом или молекулой (как возбужденной, так и непозбужденной) возможны процессы двух типов, приводящие к ионизации [13, И]. В процессе первого типа, носящем название пеннинговской ионизации, ионизация может происходить при условии, когда энергия возбуждения атома A* превышает потенциал ионизации другого атома или молекулы B:

(18.2)

В процессе второго типа, который называется ассоциативной ионизацией, часть энергии, необходимая для отрыва электрона, выделяется в результате образования молек>^лярного пона:

$$A^* \quad \text{ЬВ--АВ}^* + e. \qquad (18.3)$$

в случае, если энергия связи молекулярного иона AB+ превышает потенциал ионизации молекулы AB, процесс ассоциативной ионизации может протекать и при участии невозбужденных частиц. Подобная ситуация имеет место в случае ассоциативной ионизации при столкновении атомов V и Th с атомами и молекулами кислорода. Приводимые в табл. 18.5 и 18.6 значения сечений и констант скорости пеннинговской и ассоциативной ионизации характеризуются погрешностью несколько десятков процентов.

18.4. ПРОЦЕССЫ РЕЗОНАНСНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ

К этим процессам относятся

$$\text{AB+} + \text{A B} - ^\wedge \text{A B 4 AB}^\wedge; \qquad (18.4)$$

$$\text{AB-} + \text{A B} ^\wedge \text{A B} + \text{A B} -. \qquad (18.5)$$

$$A^\wedge \quad h A . - ^\wedge A ^\wedge \quad A^\wedge \qquad (18.6)$$

$$\text{A-} + \text{A} - ^\wedge \text{A} + \text{A-}. \qquad (18.7)$$

Основным источником информации о параметрах этих процессов является расчет на основании асимптотической теории [17], погрешность которой 10—30% существенно ниже погрешности современного эксперимента. В табл. 18.7—18.9 приведены сечения процессов (18.4)—18.7) при различной энергии столкновения [20].

Таблица 18.7. Сечение резонансной перезарядки положительных и отрицательных молекулярных ионов на молекулах того же сорта, IQ-i" см^ [20]

Ион	Энергия столкновеИ5ь эВ					
	0,1	1.0	10	100	1000	10 000
н;	-	25	17	7	7	6
N^	66	52	38	32	23	–
о:	50	36	25	18	14	—
CO+	82	67	52	39	29	—
NO+	49	37	25	17	5,5	—
Ck	13	7	5,5	4,7	2,2	_

Таблица 18.8- Сечение резонаисной перезарядки иона на собственном атоме, Ю"® см^ [20]

Атом	Энергия столь . эВ					
	0,1	,	ю	100	№00	10 000
и	**67,1**	**49,2**	**36,7**	**26,2**	**17,2**	**9,5**
He	**37,1**	**27,4**	**20,8**	15,3	**10,6**	**6,6**
Li	313	**228**	**180**	140	103	70,8
Бе	150	108	83,6	**63,9**	46,6	31,4
B	120	83,2	**62,0**	45,0	30,5	18,4
C	95,6	58,7	40,7	28,2	18,3	**10,5**
N	60,5	39,5	28,5	20,4	13,7	**8,1**
O	60,2	41,3	30,3	21,6	14,4	8,4
F	54,7	33,5	23,2	16,0	10,5	6,1
Ne	38,3	25,7	18,9	13,7	9,4	5,9
Na	350	264	212	**168**	**128**	92,0
Й	211	155	123	96,0	72,4	51,2
Si	204	147	ИЗ	84,7	60,2	38,9
P	**169**	106	76,1	55,0	37,9	23,7
S	110	75,3	57,1	43,0	31,0	20,8
Cl	99,3	66,0	48,7	55,6	24,5	15,3
Ar	100	54,1	42,9	31,0	21,5	13,8
K	71,9	44,2	36,6	27,7	20,2	13,8
Ca	457	347	282	225	174	127
Sc	301	218	174	138	105	76
Ti	281	206	165	131	101	74
V	273	196	157	124	96	70
Cr	279	208	168	135	105	78
Мп	239	181	144	114	86	61
Fe	241	177	142	114	88	64
Co	223	163	130	104	80	59
Nl	227	171	139	112	87	65
Си	235	182	148	120	94	70
Zn	207	161	130	104	79	58
Ga	174	128	102	81	62	45
Ge	189	154	123	94	67	46
As	145	118	94	72	52	36
Se	105	86	69	53	39	27
Br	105	86	68	53	39	27
Kr	128	78	56	41	30	20
Rb	90	62	48	37	28	18
Sr	500	386	316	256	201	150
V	**326**	253	206	166	**129**	96
Zr	**255**	214	177	142	111	82
Nb	235	198	164	132	103	**76**
Mo	218	182	149	119	91	**66**
Tc	210	176	144	114	88	64
Ru	221	186	154	124	97	72
Rh	198	166	135	107	82	59
Pd	195	163	**133**	105	80	58
Ae	50	37	25	17,1	10,2	5,8
Cd	224	170	137	109	84	61
In	191	141	ИЗ	90	70	51
Sn	208	171	137	107	79	55
Sb	158	129	102	78	57	39
Te	137	114	92	72	55	40
I	128	106	85	67	51	36
Xe	146	97	73	56	41	29
Cs	116	82	64	51	39	28
Ba	548	427	359	292	231	174
La	400	296	240	194	152	114
Ce	**328**	278	233	191	152	116
Pr	**218**	182	**149**	118	91	66
Nd	352	299	249	202	160	120
Pm	244	204	167	133	102	74
Sm	244	204	168	133	102	74
Eu	362	307	256	209	165	125
	297	250	207	167	130	97

Продолжение табл. 18.28 *Продолжение табл. 18.29*

Атом	Энергия столкновения, эВ					
	0,1	1	10	100	1000	10 000
Gd	**264**	**222**	**184**	**148**	**115**	**85**
Tb	**218**	**182**	**149**	**118**	**90**	**64**
Dy	**214**	**179**	**146**	**115**	**87**	**62**
Ho	**210**	**174**	**142**	**112**	**85**	**61**
Er	**210**	**174**	**141**	**112**	**85**	**60**
Tu	**208**	**174**	**141**	**111**	**84**	**60**
Yb	**250**	**210**	**172**	**137**	**105**	**76**
Hf	**247**	**210**	**175**	**143**	**ИЗ**	
Ta	**208**	**176**	**146**	**118**	**93**	70
W	**241**	**174**	**140**	**115**		**66**
Re	**226**	**192**	**160**	**130**	**103**	**78**
Os	**179**	**151**	125	**101**	**79**	**59**
Ir	**172**	**145**	**120**	**97**	**78**	**57**
Pt	**158**	**132**	**108**	**86**	**66**	**48**
Au	**158**	**132**	**109**	**87**	67	**49**
Hg	**158**	**120**	**97**	**78**	**60**	**45**
Tl	**204**	**169**	**137**	**107**	**80**	**57**
Pb	**218**	**148**	**112**	86	**64**	**44**
Bi	**186**	**155**	**128**	**102**	**79**	**59**
Po	**117**	**95**	**75**	**57**	**41**	**28**
Ac	**348**	**297**	**249**	**205**	**164**	**127**
Th	**282**	**239**	**199**	**162**	**128**	**97**
Pa	**314**	**266**	**222**	**181**	**143**	**108**
и	**295**	**221**	**209**	**171**	**136**	**104**
Np	**455**	**391**	**330**	**273**	**221**	**172**
	376	**320**	**269**	**220**	**176**	**135**
Am	**488**	**422**	**357**	**297**	**241**	**190**
Cm	**456**	**392**	**333**	**277**	**225**	**177**
Bk	**477**	410	**347**	**288**	**234**	**183**
No	**438**	**375**	**316**	**261**	**210**	**162**

Таблица 18.9. Сечение резонансной перезарядки отрицательного иона на собственном атоме, 10-16 см® [20]

Атом	Энергия столкновения, эВ					
	0,1	1,0	10	100	1000	10 000
H	415	266	172	104	23	
Li	640	480	375	233	145	79
B	323	239	140	72	30	9,2
C	166	118	80	50	29	14,1
O	123	85	55	33	17,6	8,1
F	85	59	41	27	16,6	9,2
Na	822	628	461	322	209	123
Al	380	292	202	126	62	36
Si	222	166	120	82	53	31
P	293	212	145	93	54	28
S	148	110	78	53	34	19,4
Cl	122	84	61	43	**29**	**18,5**
K	939	723	537	380	252	**152**
Fe	–	807	588	406	261	150
Co	605	475	361	263	182	117
Ni	463	368	284	211	150	100
Си	472	373	286	212	149	98
Se	181	138	101	71	47	29
Br	153	104	77	56	39	26
Rb	–	906	691	507	253	229
Ag	487	388	302	227	163	110
Sn	313	242	181	130	89	57
Sb	326	254	187	132	88	54
Te	220	170	127	91	62	40
1	162	129	99	74	53	36
Cs					773	505
Au	320	265	2ТБ	171	132	99

18.5. ИОННО-МОЛЕКУЛЯРНЫЕ РЕАКЦИИ

Таблица 18.10. Константа скорости процессов, происходящих при участии молекулярных ионов, *k*, 10-30 смв/с (*T* 300 К) [21]

Процесс	*k*	Процесс	*k*
He+ + 2He Heg + He	1,0	Hg+ + 2 H g - H g ^ + H g	1 (700 K)
Ne+ + 2Ne ^ Ne^ + Ne	0,60	He2 + 2He ^ He^ + He	1,7(77 K)
Ar+ + 2Ar ^ Ar2 + Ar	2,2	A r 2 + 2 A r A r ^ + A r	32(77K)
Kr-^ + 2Kr ^ Kr2 + Kr	2,3	Arg + Ar + He ^ Arз + He	5,5(80 K)
Xe+ + 2Xe ^ Xe^ + Xe	2,8	Csg + 2Cs CS3 + Cs	300
CS+ + 2 C S - Cs^ + Cs	150	Ne+ + N e + He Neg + He	3,0

Процесс	k
Ar+ + Ar + He ^ Ar3 + He	1,0(82 K)
Kr+ + Kr + He Kr2+He	0,6
Xe+ + Xe + He ^ Xe^ + He	1,3
Hg+ + Hg+He-^ Hg^ + He	1,7 (700 K)
Ne+ + 2He ->NeHe+ + He	0,21
ARt + Ar + Ne -> Ar2+Ne	3
HeH+ + 2He He2H+ + He	0,4 (200 K)
Hj+2Ar H3 Ar + Ar	1
LI+ + 2AГ — Li+Ar + Ar	1,8
№+ 2H, - Hз" + H,	30
D+ + 2D2 +	30
H; + 2H, H! + H.	0,65
D^ + 2 D , D ^ + D,	0,45
N+ + 2N, Ng^ + N,	30
Nt + Na + He ^ N^ + He	**30 (80 K)**
	85
O2 + Ю, ^ O t + O a	2,5
Og+Oj + He -VO4+ He	1.5
O2+O2+KГ O4 + Kr	8 (180 K)
OrЧOr+HrO -K O^+HaO	***1,5***
O^ + SN^ O2N2 + N2	0,8
+ + O2N, + He	19 (80 K)
O^ + Ha + He^Or'H,+He	0,74 (80 K)
o; + Oз + He-^Ot + He	100 (200 K)
O^ + Na + He -v N^O^ + He	54 (80 K)
N0+ + 2NO N2O2 + NO	5
CO+ + 2CO C2O2+CO	140
COJ + 2CO2 ^ Qo;+co,	320
CrH^+rCaH^ ^C4H8+C2H4	2000
02+C02 + He ^ CO;+He	23 (200 K)
0l + li,0 + ne N^Og^He	52 (200 K)
O^SOg + He ^ SO4 + He	600 (200 K)
Mg+ + 02 + Ar->Mg02 +Ar	2,5

Процесс	k
Ca-^ + O2 + Ar CaOg + Ar	6,6
Fe+ 4- O2 4- Ar FeOg + Ar	1,0
Na+ + O2 + Ar NaOg + Ar	0,2
K+ + O2 + AГ KO2+AГ	<0,2
Li+ + 2N2 ^ LiNa + Na	2,0
LR + 20, ^ LIOG^O, + NAOG+Oa	1,1
LiN^ + ***2N,*** ^ Li (N2); + N2	0,1(193 K)
O2N2 + N2 + He N4O2 + He	2,2
0; + 0j + He +	10 (80 K)
0; + N2 + He 04N^ + He	5 (80 K)
O:+202 +	10(80K)
Oe+202	0,07
NO + 2N2 N0+N2 + N5,	25 (90 K)
N0- + 202 -	0,2
NO+ + 2CO2 ^ NOCO2 + CO2	**0,09**
NO+ + COa + He ^ NOCOg + He	**24**
NO+ + CO2 + Ar NOCO2 + At	4
NO+ + CO2 + N2 — NOCO2 + N2	25 (200 K)
NO+ + 2NH3 ^ NONH3 + NH3	**30 (200 K)**
NH4 + NH3 + O2 N2H7 + O2	54
Na+ + 2CO2 ^ NaCOg + CO2	1800
Na+COa + 2CO2 Na+ (€02)2 + COg	50
CS++S02+N2^ CSSO2+N2	0,05
Na+ + He + H2O ^ NaH20+ + He	30
Na+ + 2H2O NaH20+ + H2O	4,7
K-^ + He + H2O KH2O+ • 1- He	100
K+ + 2H2O ^ KHaO^ + H^O	2,6
Cs+ + H2O + N2 C5HrO+ + N2	45
Xe+ + H2O + He XeHaO + He	9
NO+ + H2O + He ^ NOH2O+ + He	15
NO+ + H2O + N2 ^ NOH2O+ + Na	34
NO+ + H2O + 02-^ NOH2O+ + O2	150
	86

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

	j 1
NO+ + HrO + NO ^ NOH2O+ + NO	150
NO + 2H2O NOH2O+ + H2O	150
NOH^O + H,0 + Нэ NO +He	300
NOH2O+ + HjO + Ar N0 (H20)2 + Ar	900
NOHaO+ + H2O + N2 NO (H20)2 + N^	1100
NOH2O+ + H2O + 0 2 - ^ NO (H20)2 + Oa	800
NOH2O+ + H2O + NO N0(H20)2+N0	1100
H3O+ + H2O + He H5O2 + He	120

Процесс	*k*
H3O+ + HjO + Ar ^ H5O2 + Ar	40
H3O+ + HrO + N2 H5O2 + N2	340
H3O+ + HaO + Or ^ *и,0;* + O2	270
NO2 + HjO + N2 ^ N02Ha0+ + N2	500
O2 + H2O + He -V H2O3 + He	87
O2 + H^O + N2 ^ H2O3 -f N2	270
o2 + H2o + o2 ^ HrO^ + Oa	200
O 2 + H 2 O + A Г ^ H2O3+Л1?	170

Таблица 18.11. Константы скорости процессов, происходящих при участии молекулярных отрицательных ионов, к, 10-м см« (Г = 300 К) [21]

Процесс	*k*
O- + 2O2 ^ O - + O2	0,9
O - + 2O2 O - + O2	0,4
0 - + 02 + He ^ 07 + He	0,34 (200K)
O- + CO2 4- He CO- -I- He	150
O- -f 2CO2 CO - + CO2	90
O^ + CO^+He ^ CO^ + He	47 (200 K)
O7 + 2CO2 CO^-f CO,	9
O 7 + C O 2 + O2 CO7 + O2	20
O- + N2 + He ^ N2O- -h He	0,04(200 K)
O^ + N^ + He .N^O^ + He	0,04(200 K)

Продолжение табл. 18.11

Процесс	*k*
O- + H2O + O2 ^ H2O- + O2	100
O - + H2O + O2 H2O- + O2	160
O^ + H г O + O, ^ H . P - + O 2	210
HjO- + H2O + O2 H4O- + O2	540
NO- + COa + Ar ->. NO-CO2 + Ar	56
NO- + N2O -Ь Ar ^ N3O- + Ar	7,8
N O - + H2O NO ^ NO2H2O- + NO	150
Br- -f 2BГ2 ^ Br- + Bra	29
C1- -f- H2O + N0 ^ aH3O- + NO	120
W O - + O2 -h Ar ^ W O 7 + Ar	10^

18.6. ПРОЦЕССЫ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ

Нейтрализация заряженных частиц в объеме плазмы происходит в результате различных рекомбинационных процессов. Эти процессы характеризуются коэффициентом рекомбинации, который определяется соотношением

$$dNJdt = \qquad (18.8)$$

где ***N-, N+*** — концентрации отрицательно и положительно заряженных частиц; Орек — коэффициент рекомбинации, который зависит от сорта рекомбинирующих частиц, состояния плазмы и конкретного механизма рекомбинации.

Тройная рекомбинация. Процесс, ответственный за нейтрализацию плазмы с достаточно высокой плотностью заряженных частиц, описывается формулой

(18.9)

(А—атомарный илн молекулярный ион). Выражение для коэффициента тройной рекомбинации, см^/с, имеет вид [12]

$$\text{Jl/2 y9/2} \qquad Ne\text{--}\ \frac{0.6 \cdot 10\text{-}^{\wedge}Wg}{\text{y9/2}} \qquad (18.10)$$

где e — заряд электрона; Ne — плотность электронов, см–'; Ге — температура электронов, эВ. Выражение (18 10) справедливо в пределе больших плотностей электронов, когда переходы между высоковозбужденными состояниями атомов (молекул) обусловлены неупругими соударениями с электронами, а излучательные процессы несущественны. Кроме того, предполагается, что температура электронов Те много меньше потенциала ионизации атомной частицы, так что при столкновениях наиболее вероятны переходы между близко расположенными энергетическими состояниями. При нарушении указанных условий коэффициент тройной рекомбинации будет зависеть от сорта рекомбинирующей частицы. На рис. 18.3 представлены зависимости отношения ОпЛ'е от температуры плазмы для атомов K, Cs, N, Ar, He, H [12]

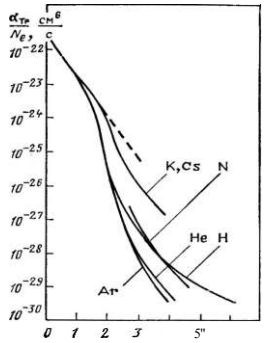


Рис. 18.3 Коэффициент радиационно-столкновительной рекомбинации при различной температуре для различных газов [12]

Диссоциативная рекомбинация. Этот процесс является основным каналом нейтрализации заряженных частиц в низкотемпературной плазме, где основным сортом положительных ионов являются молекулярные ионы [15]:

$$\bullet\ \mathbf{AB\text{-}^{\wedge}A + B.} \qquad (18.11)$$

Обычно один из продуктов диссоциативной рекомбинации оказывается в электронно-возбужденном состоянии. Значения константы скорости диссоциативной рекомбинации, полученные в результате усреднения многочисленных экспериментальных данных, представлены в табл 18.12, погрешность составляет 10—20%. Данные об энергетической зависимости сечений и температурной зависимости коэффициентов диссоциативной рекомбинации приведены в табл. 18.13, где указаны также диапазоны температуры и энергий, в которых погрешность приводимых аппроксимаций не превышает 30%.

Ион-иониая рекомбинация. В плазме электроотрицательных газов важный механизм нейтрализации заряженных частиц связан с ион-ионной рекомбинацией:

(18.12)

$$\mathbf{A^{\wedge} + B\text{--}f\ R\text{-}^{\wedge}A + B + R.} \qquad \mathbf{(18.13)}$$

Значения константы скорости парной ион-ионной рекомбинации (18.12) при комнатной температуре приведены в табл. 18.14. Эти данные получены путем усреднения по результатам многочисленных экспериментов [17]. Погрешность указанных данных достигает 50%. Коэффициент парной ион-ионной рекомбинации характеризуется следующей зависимостью от температуры газа:

(18.14)

где Со — значения коэффициента при $T=TQ$.

При давлении, превышающем несколько сотен Паскалей, основным механизмом ион-ионной рекомбинации становится не парная (18.12), а тройная (18.13) рекомбинация. Константа скорости этого процесса характеризуется немонотонной зависимостью от давления с максимумом при р » 10® Па [17].

В табл. 18.15 представлены зависимости констаит скорости тройной ион-ионной рекомбинации отрицательного иона галогена и положительного иона инертного газа от плотности инертного газа, атомы которого играют роль третьей частицы [19].

18.7. ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Отрицательные ионы могут обпазовываться в результате парных процессов диссоциативного прилипания электронов [17]:

$$\mathbf{AB + e\text{-}^{\wedge}A\text{-}r\ B\text{-},} \qquad \mathbf{(18.15)}$$

в результате захвата электрона в автоионизационное состояние отрицательного иона и последующего тушения этого состояния при столкновении с третьей частицей:

$$\mathbf{e{+}AB\text{-}^{\wedge}(AB^{*})\text{-};\quad (AB^{*})\text{-}4\text{-}M\text{-}^{\wedge}AB\text{-}{+}M.} \qquad \mathbf{(18.16)}$$

и в результате прилипания электрона к молекуле при тройном столкновении:

$$\mathbf{e + AB + M\text{-}^{\wedge}AB\text{-}{+}M.} \qquad \mathbf{(18.17)}$$

Константа скорости диссоциативного прилипания (18.15) является функцией средней энергии электронов в газе. Константа скорости процесса (18.16) измеряется в см^с, однако зависит от давления и состава газовой смеси. Константа скорости тройного прилипания, cvPjc, зависит от температуры и состава газа. В табл. 18.6—18.20 и на рис. 18.4 приведены сечения п константы скорости процессов (18.15)—(18.17).

Таблица 18.12. Коэффициент диссоциативной рекомбинации при Г = 300 К, Ю"' cm^/c [15]

Ион		Ne;	Ar;	КГ2		HeNe"	c;	O2	N;	N0+
«	0,3	1,8	6,9	10,3	20	0,2	10 (lOOK)	2,0	3,3	3,7
Ион	CH+	C0+	c o ;	CH;		He^	Cs^		cs;	
a	5(100K)	6,8	3,6	8,7 (100 K)		34(80K)	1,7 (600K)		0,2(600 K)	
Ион		N;		H3O+	HбOa			Hso;	NH4	NaOj
«	23 (200 K)	15	17 j	10 (540 K)	20 (540 K)	34		36	18	50
Ион	NaCOa	HxxOt	HisO;	NH4-NH;	NH4 (NHg);	NH4 (NH3);	H'3	CO.CO+	H:	COUCOh
a	50	80	28	27	25	25	2,3	13	30	19

Таблица 18.13. Энергетическая зависимость сечения и температурная зависимость константы скорости диссоциативной рекомбинации электронов и молекулярных ионов [16]

Ион	, 10"»- CM'	10-' CMS/C	Примечание
н /	$K_{0,1}^{\wedge J\ 0,92}$	2,3	–
HD^	$0,1^{\wedge J\ 0,92}$	$2,3\left(\frac{/\ 300}{|}\right.\Gamma$	–
	$5,5\left(\frac{/\ 0,1}{j}\right.^{\text{ч}\,0.8}$	$1,6\left(\frac{(\ 300}{|\quad j}\right.^{N\,0,3}$	
	$8\ /\left(\frac{0,1}{Fg}\right.^{0,92}$	$\frac{300}{l}$	
	$2,5\left(\frac{/\ 0,1}{|}\right.^{Y\ .\ O}$	$0,86\left(\frac{1\ 300}{|}\right.^{Y\ .\ 5}l$	
OH^	$\left(\frac{O,T\ ^{\wedge}}{^{\wedge}\ ^{\wedge}}\right)^{1.0}$	$0,75\left(\frac{/\ 300}{}\right.^{Y\ .\ 5}$	
	„ 1 ' 0,r	300 j	–
	$\left(\frac{(\ 0,1}{J}\right.^{Y\ .\ O}$	$3,5\left(\frac{f\ 300}{|\quad I}\right.^{Y\ .\ 5}$	
NO*	$\frac{0,1\ ^{\wedge}}{j}$	$2,3\left(\frac{/\ 300}{|\quad ^{\wedge}\ j}\right.^{0.5}$	
O2	$4,5\left(\frac{(0,1}{}\right.$	$1,9\left(\frac{/\ 300}{|}\right.^{\backslash 0,5}l$	
400			

Продолжение табл. 17.16 *Продолжение табл. 17.17*

300

Te,

. *Te]* U

300 X^SS

Te

300

Te

0,1

2,3 { 300

{ 0,1

0,1

5,0 300

0,1

Г„ <2000 К, в^<0,15эВ

e^>0,15 эВ

7,0 300

в^.<0,07эВ, Г„ <1000 К

5,6

e<,>0,07 ЭВ

0,1

7,0 ee<0,08эВ, Г^<1000 К

Te

0,2

£<,>0,08 эВ

0,04

£^<0,05 эВ

E^>0,05 ЭВ

s<,<0,09 эВ

0,2

e<,>0,09 эВ

Ee <0,5 эВ

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

	0,5		£^>0,5 эВ
	0.1 у		£^<0,15 эВ
			Ее >0,15 эВ
Н3О- (D3O+)		300	£<,<0,1 эВ, Г£< 1000 К
	0,2		£^>0,1 эВ
		300	
		Te	
Q H :		300	£^<0,1 эВ
			£^>0,1 эВ
	0,1	/ 300	r_n <0,1 эВ
	0,2		£,>0,1 эВ
нсо*		**2,0**	T^ = 300 К
	0,1	7,5 300	£,,<0,1 эВ
	0,2 V	***Te*** /	E,>0,1 эВ
CO^		3,8	T, = 300 К
K		36	T^ = 205 К
		25	Г, = 300 К
H3O^-CH^O)		22	Г^ = 415К
			Г, = 300 К
			Te = 300 К
Н30+.(Н,0)з		49	
Н3О-.(Н20)4		60	Te = 205 К
Н30^--(Н20)5		75	T^ = 205 К
NH; -(NHg)			

Продолжение табл. 17.16

NH^ • (NHs),

• (КНз)з

CO^,(CO)

CO+,(CO)2

о ;. (Ог)

Продолжение табл. 17.17

Примечание

-ее

н (f)"•"

Te = 200K

Г е = 2 0 5 K

Таблица 18.14. Константа скорости парной ион-ионной ргкомбинации при Г-= 300 К- Ш"' см^/с (17, 18]

Пага	k tl7] 1	Пара	k [18]
№ Н-	8,6	с а ; -h c i-	0.45
о + о-	1,4	CC IsF^ + c i-	0,41
W 0-	1,4	c c i, f ; + c i-	0,41
о ; + о -	4,2	NH^ + Cl-	0,67
Nj + 0-	1.6	Ci ; + c i-	0,5
N0+ лю;	3,4	02 + C03	0,95
O j x N O -	4,1	CF3 + F-	0,58
NO++NO3	0,45	NFg + F-	0,75
O+ + O2	2	n , f m - f -	0,85
№^ + 0-	1,3	Нз0МН,0)з + К0з	0,55
Ш2 и-	1,2	Нз0+{Н,0)з+Н0; HNO3	0,57
	1,2	NO-(NO,)H-No3(HNo3)3	0,35
SFj-rSF-	0,4		
SF54SF-	0,4	NH4 (NHg)^ + CI-	0,79
CCl2 + c i-	0,45	NH^^ (NH3), + NO2	0,49
		H3O^ {H20)3 + Cl-	0.68

Таблица 18.15. Коэффициент тройной ион-ионной рекомбинации при различных значениях концентрации атомов инертного газа при Т= 300 К, Ю"» смз/с [19]

	Концентрация атомов инертного газа.							
	0,27	0,81	2,7	5,4	10,8	27	54	135
Кг+ + F-	0,19	0,52				2,1		0,45
						,0		0,20
						0,56		0,13
						0,47		0,09
								0,45
Kro + F-	0,180,4S					2,0		0,19
		0,72				0,95		
		0,8?				0,60		
		0,96				0,44		
Xe++ CI-	0,120,3					2,1		0,50
		,1(0,68				0,8		0,17
	0,310,80					0,54		0.12
						0,34		
Xeg +C1-						20		0,48
						0,81	0,42	0,17
						0,52	0,27	0,11
						0,40	0,19	

Таблица 18.16. Сечение диссоциативного прилипания электрона к молекуле SO_j, отвечающее образованию отрицательных ионов различного сорта, Ю-'» см^ [23]

Энергия электрона, эВ	Сорт отрицательного иона		
	o-	S-	SO-
2,5	0,01	0,0	0,0
3,0	0,10	0,013	0,02
3,1	0,16	0,019	0,0
3,2	0,22	0,034	0,03
3,3	0,36	0,056	0,03
3,4	0,58	0,079	0,16
3,5	0,89	0,122	0,16
3,6	1,34	0,167	0,36
3,7	2,20	0,225	0,54
3,8	3,16	0,276	0,84
3,9	4,38	0,298	1,41
4,0	5,58	0,313	2,05
4,1	6,92	0,310	3,27
4,2	7,52	0,295	4,58
4,3	8,08	0,271	6,94
4,4	8,02	0,246	8,51
4,5	7,22	0,231	10,10
4,6	6,48	0,191	10,80
4,7	5,48	0,162	10,98
4,8	4,69	0,164	10,53
4,9	3'79	0,131	9,07
5,0	2,14	0,114	7,76
5,1	2,56	0,091	5,86
5,2	1,90	0,065	4,84
5,4	1,12	0,044	2,80
5,6	0,69	0,028	1,21
5,8	0,45	0,013	0,62
6,0	0,43	0,015	0,39
6,2	0,81	0,008	0,33

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

Энергия электрона, эВ	Сорт отрицательного иона		
	o-	S-	SO-
6,3	0,86	0,018	0,46
6,4	1,17	0,017	0,40
6,5	1,32	0,020	0,58
6,6	1,59	0,022	0,44
6,7	1,80	0,019	0,52
6,8	2,10	0,017	0,58
6,9	2,33	0,025	0,41
7,0	2,56	0,027	0,42
7,1	2,68	0,026	0,40
7,2	2,41	0,030	0,42
7,3	2,47	0,031	0,51
7,4	2,41	0,031	0,44
7,5	2,14	0,036	0,51
7,6	1,89	0,030	0,43
7,7	1,56	0,029	0,33
7,8	1,33	0,027	0,28
7,9	1,06	0,016	0,21
8,0	0,93	0,015	0,21
8,1	0,76	0,015	0,13
8,2	0,61	0,015	0,11
8,3	0,50	0,013	0,05
8,4	0,35	0,013	0,0
8,5	0,27	0,014	0,01
8,6	0,25	0,016	0,0
8,7	0,14	0,026	–
8,8	0,09	0,021	–
8,9	0,07	0,030	–
9,0	0,04	0,027	–
9,1	0,04	0,026	–
9,2	0,02	0,017	–
9,3	0,01	0,015	–
9,5	0,01	0,002	

В. 17. Константа скорости диссоциативного прилипания электронов к молекулам в электрическом поле, Ю"'" см-'/с [23—25]

Молекула	*E/N*, 10⁻¹⁶ в с.												
	0,2	0,5	.	5	10	15	20	25	30	40	50	60	!
SFe	—	—	—	6,3	7	7,8	7,3	6,8	6,8	6,7	6,5	5,8	
CF^		–	—	0,39	0,68	0,68	0,64	0,5	0,46	—	—	-	
C^Fe	—		—	—	—	—	—	2,7	2,6	1,5	0,65		
C₃F₈	—	–	—	–	—	—	—	3,0	2,4	1,8	1,0	—	f
C4Fio	–	–	—	-	—	-	—	3,3	2,3	1,0	0,6	–	!
CCI2F2	–	—	—	—	—	—	—	—	4,6	4,6	3,9	2,5	t
H2O	—	—	—	0,017	0,8	1,0	0,78						;
N,0	6,5-10-"	1,2-10-^	0,001										
HC!	1,6	2,6											
HBr	34												
HI	БЗ	26	—										

Таблица 18. Коэффициент диссоциативного прилипания электрона к молекулам в электрическом поле. Ю-" см^/с [23—25]

Молекула	Средняя энергия электронов, эВ							
	0,25	0,5	0,75	1	1,5		2,5	3
CCl_4	700	450	350					
$CHCl_3$	150	195	130	80				
CH_2Cl_2	35	90	120	110	—	—	—	—
C_2Cl_3	40	80	95	70	—	—		
1-1-1-$C_2H_3Cl_3$	44	50	52	36				
М-2-$C_2H_3Cl_3$	16	35	40	30				
CH_3Br	0,48	0.2	0,1	0,022	0,0075	0,0016		
QH_5Br	0,19	0,65	0,84	0,63	0,34	0,16	0,075	
н-C_3H_7Br	0,23	0,67	1,0	0,65	0,32	0,17	0,085	
«so-CiH_5Br	0,33	0,85	1,2	0,75	0,40	0,18	0,12	
«so-$C_5H_{11}Br$	0,45	1,0	1,4	0,8	0,42	—	—	
К30-C_3H_7Br	0,48	1,2	1,5	0,9	0,5	0,3	0,2	
	320	130	68	40				
2-C4F,	370	420	400	300				
1,3-QFe	570	300	190	135				
	390	350	260	170				
2-QF	300	230	170	120				
ijuc-CsFg	1000	480	310	210				
	980	480	300	200	—		—	
	940	540	330	220	—	—		
	1000	540	330	220	—	—		—
	930	540	330	220				
	200	150	100	70	—	—	—	—
	1200	800	500	320	—	—	—	
	500	220	100					
	15	18	20	14				
	—	0,027	0,16	0,3				
CO,	—	—			0,0003	0,0011	0,009	
F	130	90	60	45	25	20	16	14
Br,	0,65	1,3	1,5	—	—			
HBr	4	8,6	7,6	6,2	4,6			—

Таблица 18.19. Константа скорости тройного прилипания электрона к молекуле (Г 300 К) к, 10-31 CMVC [17]

Продолжение табл. 18.19

Третья частица	k	Третья частица	k
Молекула Oj			
	0,45		**0,85**
	0,23		
	0,5		
	0,5		
H_2O	143	Молекула CO	
CO,	31	CO 1	2,7
H_2S	100	Молекула NjO	
NH_3	75		0,06
	25		0,03

Таблица 18.20. Константа скорости разрушения отрицательного иона при соударении с атомной частицей (Г = 300 К) [17]

Продолжение табл. 18.20

Реакция	Дефект энергии, эВ	Константа скорости, 10^{-7} смз/с
H- + H -V Hr + e	3,8	1800
H- + NO ^ HNO + e	1,25	1200
	1,4	500
H- + co ^ HCO + e	0,54	50
0- + O oй - e	3,6	200
0 - + N-^N0 + e	5,1	200
0- + H2^H_0 + e	3,1	600
0~ + NO NO2 + e	1,4	200

Продолжение табл. 18.28

Реакция	Дефект энергии, эВ	Константа скорости, 10-^2 см^3/с
O- -^C0->C02+ e	4,0	600
	2,1	2000
	1,2	800
0- + 0, (1Д5)-^Оз + e	0,5	300
07+0,-^20^ + 6	-0,43	2,2-10-'' O,C3(CC0K)
0 - + N , - 0 , + N, + <.	—0,43	0,00018 (600 К)
O ~ + O Оз + c	0,6	300
+ N KOo + e	4,0	<00
o7 + o, СД^,) £0, Ч- c	0,6	£00
СГ + Ы->HC1 + e	0,7	SOO
OH- + 0 НОа Ч- e	0,9	200
	3,2	1000
CN~ + H HCN H" e	1,5	1000
S - + O.-^SOa + e	3,8	30
S- + CO-^COS + e	1,6	300
C- + C0--C20 + e	2,0	400

Продолжение табл. 18.29

Реакция	Дефект энергии, эВ	Константа скорос-га, 10-^ см^3/С
C- + CO -и^гсо + e	4,3	500
CO + N^ + e	8,2	900
C- + N20<f ^C N + NO + e	1,6	
F - + H HF e	2,5	1600
C1--гН-^НС1 + e	0,7	1000
I- + H-^HI + e	~0	60
СГ + N^C1N + e	0,7	10
CI- + O^C Ю + e	0,9	10
NO- + He KO + He + e	-0,02	0,27
NO - Ч }(KG + He + e	-0,02	0,035
KO"-i 1.2-> bC H2+e	-0,02	0,26
Ш- + KO-^2KO + e	-0,02	6
NO- + CO NO + CO + e	-0,02	0,55
NO- + NjO -V NO N2O + e	-0,02	6,1
NO- + CO2 NO + CO2 + e	-0,02	9,5
NO- + NHa-^ NO + NH3 + e	-0,02	22
CN- + H -- HCN + e	1,0	800
HS- + H-^H2S+e	1,7	1300

Таблица 18.21. Сечение тушения резонансно-возбужденных атомов щелочных металлов молекулами (Г = 400 ~ 500 К), 10-16 см^ [14]

Тушащая молекула	Na	K	K	K	Rb		Cs	
	sp			zp				
N,	39	35	39	26	47	40	66	67
Нг	17	7	4	7	6	3	7	5
HD	11	II	14	12	6	5	8	7
Da	10	2	1	8	3	5	4	3
CO	88							

Таблица 18.22. Сечение тушения резонансно-возбужденных атомов при соударении с молекулами в пламенах (Г = 1400-^ 1800 К), 10-14 см2 [4]

Тушащая молекула	Sf а	1 й	«	Sf s S	a. a	« p	
На	16,3	8,6	3,3	**3,0**	5,2	0,2	1,3
N,	12,2	22	19	**22**	48	20	18
O.	—	36	52	84		41	47
CO	40	40	42	37	–	43	41
C02	29	51	67	75		**102**	91
и, р Da	6	2	2,9	4,0	13	5,5	25

Таблица 18.23. Константа скорости тушения возбужденных атомов и молекул инертных газов при столкновениях с атомами и молекулами, Ю-и см^/с (Г = 300 К) [14]

Тушащая частица	Ne CP:)	Ar ('P,)	Ar (=P„)	Кг ГР,)	Xe ('P,)	He, CS+)	Ar	Ar CPi)
He*				—				
Ne	0,00072					0,44		
Ar		0,00011	0.00057			3,1		
Кг							0,9	0,1
Xe					0,00023		22	33

Константа скорости тушения процесса He(2'S) + He(>S„)2HeCS„) равна 0,00036-10-" см»/с.

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

Тушащая частица	Ne CP,)	Ar CP,)	Ar (»P„)	Kr CP,)	Xe CP,)		Ar CP.)	Ar CP.)
	5	8,7	7,8	3	1,6		20	25
	–	6,5	7,8	2,5				
	8,4	3,6	1,6		1,9	3,0	0,9	4,7
Or	—	17	24		22	—	25	31
CO	5,4	1,6	13	5,8	3,6	5,6	5,0	9,0
N0	–	20	25	19	27		35	56
Cl,	41	71	72	73	72			
Fs	41	75	90	72	75			
HCl	17							
HI		75						
HBr	–	52	—	—	—	—	—	—
CO,		54	59	40	45	9,5	50	74
N,0	22	44	48	31	44		45	58
NF3	7,8	14	7	12	9			
	14	3	–	33				
	–	50	55	37	33	6,1	—	—
	–	27	17	18	23		63	65
		—	—	—	—	–	56	103

Таблица 18.24. Константа скорости тушения метастабильных атомов и молекул кислорода и азота при столкновениях, IO-i^ см^/с (Г = 300 К) [14]

Тушащая	0. CA^)	0. ('S+)	0 (>S)	0 CD)	N(^)	NCP)	N2
Ar	–	–	0,039	-	-	0,07	—
N2	-	0,23	-	6100	1,5	6	-
O2	0,00019	0,02	30	5400	690	6	-
H.	0,00027	52	0,058	2-10"	290	0,19	0,27
D^	0,004	-	-	1,5-10^	-	–	-
NO	2500	5	4-im	1,7-10^	9200	3300	6600
CO	-	0,3	-	7000	405	90	440
CO2	-	19	30	1900	43	0,12	–
NjO	–	-	940	1,3-10^	-	-	-
H2O	-	330	4,2-!04	1,2-10^	-	-	-
	0,47	1900	6,9-10«	1,9-10«	–	-	-

Таблица 18.25. Сечение тушения возбужденного атома Hg (O^Pj) при соударении с атомами и молекулами (Г 3 0 0 К) [И]

Тушащая частица	H,	D,	Or	N2	CO	CO2	Xe
0, 10-W см2	22	22	57	0,9	19	9	0,002

18.8. ПРОЦЕССЫ ТУШЕНИЯ ВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Сечения и константы скорости этих процессов представлены в табл. 18.21—18.29. Погрешность приводимых данных достигает 50%.

таблица 18.26. Константа скорости тушения некоторых электронно-возбужденных атомов, радикалов и молекул, Ю-w см^/с (Г = 300 К) [14, 22]

Возбужденная частица	Тушащая частица										
	Ai	N.	O,	CU	CO	CO,	CF„	SFe	CCH	SiF<,	D,
Ar{4d[3/2])	1,9	1,6	1,3	1,3	2,3	1,6	3,3	5,1	2,2	1,6	—
	0,4	0,3	0,3	1,5	0,5	0,6	0,6	0,9	0,3	0,6	—
	1,2	1,0	0,8	1,9	1,5	1,8	1,8	2,6	0,9	1,8	–
0(3/,5 *P)*	—	2,0	1,7	3,7	3,0	3,5	4,2	4,8	3,1	3.1	—
CO (B1 2)	1,3	1,1	0,9	—	1,7	1,8	2,5	3,3	3,1	2,0	—
	0,4	0,1	0,3	–	0,6	0,6	0,9	1,1	1,0	0,7	–
		0,2		Z			0,05				
	0,22				3	1,3					
CO (a3 П)	1,8	0,15	1 ,5		12,6	0,16	—	—		—	1,6
NH (fci	2,5-10-»	4.5-10-"	2,4-10-5	—	—	—	—	—	—	—	—
ND (b' 2+)	5-10-S	3,8-10-'									
CH (c^ 2+)	—	0,0007	—	—	0,048	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 18.26

Возбужденная частица										
Ar *{4d* I3/2J)										
0(3p^ P)										
CO 2)										
CFa (liBa)										
OH {A2										3,5
CO (fi^n)	2,4	1,9	5,9							
		0,18		7-Ю-'	0,34	**0,01**	0,0039			
ND (4.12+)				5-10-S		0,009		5,2-10-«		
CH (c2 S+)									0,45	

Таблица 18.27. Константа скорости образования эксимерных молек¥л при парной реакции замещения, 10->о"см3/с (Г = 300 К) [26]

Реакция	Константа скорости
Ar№) + F, ^ ArF* + F	9,0
Ar (зРг) + NF4 ArF* + NF^	1,0
Ar (зр,) + Cl2 + ArCI* + CI	7,1
Kr (зРг) т- Fa KrF* -f F	6,2
Kr (3Pj) + NF3 KrF* + NF2	1,0
Kr + OF2 ^ KrF* + OF	5,3
Kr{зР2)+ Cl2 KrC!* + Cl	7,3
Xe (^P^) -l- F2 XeF* + F	7,5
Xe^P^) -t- NFg XeF* NF^	0,9
Xe (ЗЯ2) + OF2 XeF* -i- OF	5,7
Xe(3P2) + Ci2 XeCl*-f CI	7,2
Xe (зРг) + Взз XeBr* + Br	10

Таблица 18.28. Константа скорости k образования эксимерной молекулы при тройном столкновении A* + B + C AB* + C, 10-33 см^/с (Г=300 К) [26]

A"	в	с	Эксимерная молекула	k
He(2 3S;	He	He	He;	0,23
NeCP,)	Ne	Ne	N4	0,5
Ne(3P„)	Ne	Ne	Ne;	0,07(77 K)
Ne (iPi)	Ne	Ne	Ne^	5,8
Ar(3/>,)	Ar	Ar	Ar^	10
Ar(iPi)	Ar	Ar	Ar^	14
Ar (ЗЯ1)	Ar	Ar	Ar*	12
Kr(3^)	Kr	Kr	Kr;	36
Kr(зЯ„)	Kr	Kr	KrJ	54

Продолжение табл. 18.28

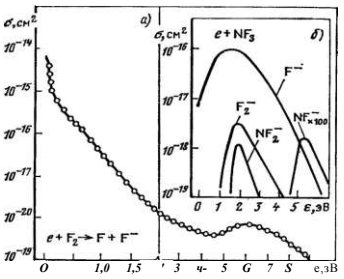
A*	в	C	Эксимерная молекула	*k*
Kr^Pi)	Kr	Kr	Krj	30
KrpPi)	Kr	Kr	Kr;	1,6
Xe№)	Xe	Xe	Xe;	55
XefPo)	Xe	Xe	Xe;	40
Xe(зр,)	Xe	Xe	Xe;	70
Hg№)	Hg	Hg	Hg;	250(470 K)
	Hg	Hg	Hg;	160
Cs((?P)	Cs	Xe	Cs;	4200 (620K)
	Xe	He	XeJ	160(670K)
Xe№)	Xe	Ne	Xe;	14
XepP,)	Xe	Ar	Xe;	26
KrpPr)	Ar	Ar	KrAr*	1,0
Xe(зр,)	Ar	Ar	XeAr*	0,7
HgpPo)	Hg	N2	Hg;	1000 (430 K)
	Hg	N.	Hg;	200
Ne{iPi)	Ne	Ne	Ne;	5,8
ArpPi)	Ar	Ar	Ar;	12
	Ar	Ar	Ar^F*	490
	Ar	AT	ArKrF*	90
	Kr	Ar	Kr,F*	600
	Kr	Kr	Kr^F*	600
	Xe	Ne	Xe^F*	780
XeF(B,/2)	Xe	Xe	Xe^F*	260

Таблица 18.29. Константа скорости тушения эксимерных молекул ft, 10-^ см^/с (Г-300 K) [26]

Эксимерная молекула	Тушащая частица	*k*	Эксимерная молекула	Тушащая частица	*k*
	Ar	9	KrF(B,^2)	Ar	5
	Kr	1600		Kr	3,6
	Xe	**4500**		F„	650
	F.	1900		KrF	370
				NF3	52

Продолжение табл. 18.29

Эксимерная молекула	Тушащая частица	k	Эксимерная молекула	Тушащая частица	
XeF(B,/2)	He	1,2		Kr	0,073
	Ne	0,77		Xe	0,31
	Ar	2,7		N2	0,061
	Xe	45		Cl2	170
		7,0		CCЦ	160
		470	HgBr (6,^2)	He	0,044
		250		Ar	0,072
	XeF	305		Xe	0,31
	NF3	18		N,	0,13
XeF(C3_.^)	He	0,12			290
	Ne	0,3			130
	Ar	0,09		CFsBr	87
	Xe	1,0		CClgBr	180
	N2	0,4			
		80	HgI(B,/2)	Ar	0,11
		240		Xe	0,22
	NF3	16		CF3I	290
XeCI (Bi .2)	Ne	1,0	HgI(C3,2)	He	3,8
	Xe	32		Ne	5,1
	HCl	1400		Ar	16
XeBr(B,/2)	Br,	800		Xe	41
	Xe	**9**		N2	24
	J	**500**	Ar,F ев,)	He	0,005
	CH3I	**360**		Ar	**0,022**
HgCl (B1/2)	He	0,041		F2	**210**
	Ne	0,033		NF3	**300**
	Ar	0,05	Kr^F (^Br)	F2	880



14. Сечение диссоциативного прилипания электрона к молекуле Fsfc) и NFg *(б)* [23]

18.9.ФОТОИОНИЗАЦИЯ И ФОТОРЕКОМБИНАЦИЯ

При фотоионизации

$$A\text{-rRio-}^A{}^{\wedge} + e \qquad (18.18)$$

энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или молекулы, содержится в излучении. Сечение фото-

ионизации атомов вблизи порога не зависит от энергии фотоиа, поэтому пороговое значение сечения фотоионизации служит основной характеристикой этого процесса,используемой при описании явлений в низкотемпературной плазме. На рис. 18.5 показана зависимость сечения фотононнзации атома гелия от длины волны налетающего фотона [281

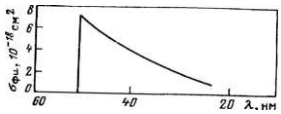


Рис 18.5. Зависимость сечения фотононизации атома гелия от длины волны падающего излучения [28]

Таблица 18.30. Пороговые значения сечения фотоионизации некоторых атомов [28]

АТОМ	Пороговая длина волны,	Сечение, 10-" см^
H	91,2	6,3
He	50,4	7,4
Li	230	2,5
Be	133	8,2
B	149	19
C	ПО	11
N	85,2	9
O	91	2,6
F	71,3	6
Ne	57,5	4
Na	241,2	0,12
Mg	162	1,2
Ar	78,7	35
K	286,0	0,012
Ca	202,8	0,45
Ga	207	0,2
Kr	84,5	35
Rb	297	0,11
In	214	0,3
Cs	318,5	0,22
Tl	203	4,5

В табл. 18.30 приведены пороговые значения сечения фотоионизации атомов [29].

Сечение фотоионизации атома водорода фотонами, энергия которых много больше энергии связи электрона в атоме (13.6 эВ), дается следующим выражением [31],

$$O\phi^{\wedge} = 23{,}8л^{7/2} \qquad \textbf{(18.19)}$$

где Я — длина волны налетающего фотона, см. Сечение фотоионизации сильновозбужденного атома, см®, с эффективным значением главного квантового числа n^* дается формулой Крамерса [30]

$$= 0{,}022л^{\wedge}/г^{*}5, \qquad (18.20)$$

Процессом, обратным процессу фотоионизации (18.18), является фоторекомбинация. Сечение фоторекомбинации электрона и иона в высоковозбужденное состояние атома, см^, с эффективным значением главного квантового числа n^* описывается соотношением, которое следует из формулы Крамерса (18.20),

2.10-WX

(18.21)

где 8 — энергия электрона, эВ. На рис. 18.6 представлена температурная зависимость коэффициента фоторекомбинации электрона и протона в водородной плазме [32]

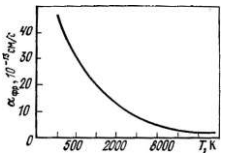


Рис. 18.6. Температурная зависимость коэффициента фоторекомбинации электрона и протона в водородной плазме [32]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизованной плазме. М.: Атомиздат. 1975.
2. Елецкий А. В.//Успехи физ. наук. 1981. Т. 134. С. 237—266.
3. Rich J. W.//Appl. Atomic Collision Physics. Vol. 3. Gas Lasers, N. Y.: Academ. Press, 1982. P. 99—140.
4. Andrews A. J., Simpson C. J. S. M.//Chem. Phys. Lett, 1975, Vol. 36. P. 271—275.
5. Drosdoski W. S. e. a.//J. Chem. Phys. 1976. Vol. 65. P. 1542—1551.
6. Bohringer H. e. a.//Ibid. 1983. Vol. 79. P. 420—429.
7. Wilkins R. L.//Ibid. 1975. Vol. 63. P. 534—540.
8. Macdonald R. G., Moore C. B.//Ibid. 1980. Vol. 73. P. 1681—1690.
9. Wilkins R. L., Kwok M. A.//Ibid. 1980. Vol. 73. P. 3198- 3206.
10. Dzelkalns L. S.. Kaufman F.//Ibid. 1983. Vol. 79. P. 3836—3847.
11. Смирнов Б. М.//Успехи физ. наук. 1981. Т. 133. С. 569—592.
12. Елецкий А. В., Смирнов Б. М.//Основы физики плазмы/Под ред. Р. З. Сагдеева и М. Розенблюта. М.: Энергоатомиздат, 1983. Т. 1. С. 58.
13. Ключарев А. Н., Безуглов Н. Н. Процессы возбуждения и ионизации атомов при поглощении света. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.
14. Смирнов Б. М. Возбужденные атомы. М.: Энергоатомиздат, 1982.
15. Елецкий А. В., Смирнов Б. М.//Успехи физ. наук. 1982. Т. 136. С. 25—57.
16. Mitchel J. B. A., McGowan P. W.//Physics of Ion-Ion and Electron—Ion Collisions. **N.** Y., Lond.: Plenum Press. 1983. P. 279—344
17. Смирнов Б. М. Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978; Смирнов Б. М. Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М.: Атомиздат, 1973.
18. Smith D., Adams N. G.//Physics of Ion—ion and

Electron—Ion Collisions, N. Y., Lond.: Plenum Press. 1983. P. 501—548.
19. Fiannery M. R.//Appl. Atomic Collision Physics. Vol. 3. Gas Lasers. N. Y.: Academ. Press. 1982. P 141—184.
20. Думан Е. Л. и др. Препринт ИАЭ им. И. В. Курчатова № 3532/12, 1982.
21. Смирнов Б. М.//Успехи физ. наук. 1977. Т. 121. С. 231-259.
22. Словецкий Д. И.//Химия плазмы/Под ред. Б. М. Смирнова, М.: Энергоатомиздат. 1983. Вып. 10. С 108—144.
23. Chantry P. J.//Applied Atomic Collision Physics. Gas Lasers. N. Y.: Academ. Press. 1982. Vol. 3. P. 35—97.
24. Orient O. J., Srivastava S. K.//J. Chem. Phys. 1983. Vol. 78. P. 2949—2957.
25. Gallagher J. W. e. a.//J. Phys. Chem. Ref. Data, 1983. Vol. 12. P. 109—143.
26. Смирнов Б. **М**.//Успехи физ наук. 1983. Т. 139. С. 53-89.
27. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах: Пер. с англ. М.: Мир. 1977. Гл. 14.
28. Weissler G. L.//Handbuch der Physik. Bd XXI. Berlin: Springer. 1956.
29. Хастед Дж. Физика атомных столкновений: Пер. с англ. М.: Мир. 1965.
30. Kramers H. A.//PhiL Mag. 1923. Vol. 46. P. 836—848.
31. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Релятивистская квантовая теория. М.: Наука, 1968. Ч. 1. С. 234.
32. Бейтс Д., Далгарно А.//Атомные и молекулярные процессы/Под ред. Д. Бейтса; Пер. с англ, М.: Мир. 1964. С. 227-255.

ГЛАВА 19

ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

А. А. Радциг, В. М. Шустряков

19.1. ВВЕДЕНИЕ

Круг процессов, охватывающих ионизацию веществ, крайне широк и разнообразен. В различных ситуациях может представить интерес ионизация атомов и молекул вещества под действием падающих заряженных и нейтральных частиц, фотонов, наложенного внешнего поля и др. Не делая попытки отразить это многообразие процессов, мы представим ниже достаточно полную информацию о важнейшей пороговой характеристике рассматриваемого процесса — потенциале ионизации атомов, атомных ионов и молекул — и приведем данные о сечении ионизации атомов и молекул электронами, т. е. ограничим свое рассмотрение наиболее распространенным способом образования ионов и электронов в плазме.

Кроме того, будет представлена информация об энергии связи электронов в отрицательных ионах и энергии, высвобождающейся при присоединении протона к атомной или молекулярной частице. Наконец, подробно рассмотрим вопрос об энергии связи электронов во внутренних оболочках атомных частиц.

Отметим также, что процессы фотоионизации атомов и молекул и процессы пеннинговской и ассоциативной ионизации атомных частиц при столкновениях с возбужденными атомами затронуты в гл. 18.

19.2. ПОТЕНЦИАЛ ИОНИЗАЦИИ АТОМНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЧАСТИЦ

Потенциалом ионизации частицы называют ту минимальную энергию, которая затрачивается на перевод ее валентного электрона в непрерывный спектр. В табл. 19.1 представлены значения потенциала ионизации нейтральных атомных частиц, полученные главным образом в результате экстраполяции к границе непрерывного спектра атома серий оптических переходов, инициируемых с помощью различных источников возбуждения. При этом либо находят предельное значение известной функции (например, формулы Ритца), аппроксимирующей высоковозбужденные (ридберговские) уровни энергии атомной частицы, либо сравнивают реальные уровни с водородоподобными, внося поправки на поляризацию атомного остова [1]. Поэтому помимо потенциала ионизации атома, эВ, приведены также предельные значения для серий оптических переходов, см-', отсчитанные от уровня основного состояния атома. Кроме того, часть данных была получена методами измерения порога фотоионизации, фотоэлектронной спектроскопии и лазерной спектроскопии ридберговских состояний атомов, а также расчетом (водород и его изотопы). В отдельной графе табл. 19.1 указаны конфигурация валентной электронной оболочки и электронный терм основного состояния атома. Основная информация о потенциалах ионизации атомов представлена в [2—6].

В табл. 19.2 собраны данные о потенциале ионизации легких и средних атомных ионов, характеризующие все ступени ионизации ионов с зарядом ядра $Z<36$ и представляющие интерес для физики высокотемпературной плазмы. Большая часть данных для низких степеней ионизации ионов была получена на основе обработки наблюдаемых спектров оптических переходов при высоких уровнях возбуждения частиц, тогда как в случае многократной ионизации использовались различные приемы экстраполяции потенциалов вдоль изоэлектронных серий [2,5,6]. В табл. 19.3 приведены значения потенциала ионизации одно-, двух- и трехзарядных атомных ионов с $37<Z<92$, найденные в основном исходя из пределов схождения линий в атомных спектрах [2,3,5,6]. Погрешности в определении искомых значений потенциалов ионизации атомных частиц в табл. 19.1—19.3 были учтены нами при округлении значащих цифр в пределах ±1 для последней приведенной цифры.

Информация о потенциале ионизации молекул включена в табл. 19.4. В этом случае минимальная энергия отвечает переходу между нулевыми колебательными уровнями основных электронных состояний молекулы и молекулярного иона и может быть названа адиабатическим потенциалом ионизации молекулы. Основными методами экспериментального определения потенциалов ионизации молекул служат методы электронного удара, фотоионизации и спектроскопического определения предела ридберговских серий в полосатых спектрах молекул. Чтобы дать представление о точности измерения значений ***IP*** для молекул, мы сгруппировали числовые данные по четырем классам точности: Л — погрешность $\hat{}17$о; В—$<3\%$; С—$<10\%$ и, наконец, £»-<307с, в соответствии с оценкой использованного метода их получения. Представленные в табл. 19.4 данные основаны на материале монографий [7,8] и многочисленных журнальных публикациях последнего десятилетия.

Таблица 19.1. Потенциал ионизации атомов

Атомный номер	Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)	Оптический предел. см-'; потенциал ионизации, эВ	Атомный номер	Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)	Оптический предел, см-'; потенциал ионизации, эВ
J	**и** (1s-^S,^, D (1S-2S„2) T (1S-2S**I**/2)	109678,774 13,5985 109708,671 13,6022 109718,546 13,6035	27	Co	**63400** 7,86
2	«He (Is2-i5„) зне (ls^-'S„)	198310,77 24,5876 198300,3 24,5863	28	Ni	61600 7,637
3	Li	43487,15 5,3918	29	Си	62317,4 7,7264
4	Be	75192,6 9,32270	30	Zn	75769,3 **9**,3943
5		66928.1 8,2981	31	Ga	48387,63 5,99930
6	C (**2p2**_8p„)	90820,4 11,260	32	Ge	63713,2 7,8995
7		117225,7 14,53414	33	As	78 950 9,789
8	**o**	109837.0 13,618	34	Se	78658,2 9,752
9	**F**	140524,5 17,423	35	Br (**4p5_2p0)**	95284,8 11,814
10	Ne (2pв-15„)	173929,7 21,565	36	Kr	112914,5 13,9997
11	Na	41449,4 5,13907	37	Rb	33690,88 4,17717
12	Mg	61671,0 7,6463	38	Sr	45932,1 5,69490
13	Al	48278,42 5,9858	**39**		50 144 6,217
14	Si	65747,8 8,1517	40	Zr	53 506 6,634
15	p	84580,8 10,4868	**41**	Nb (4d«5s-«£),/2)	54 514 6,759
16		83559,3	42	Mo (4d^5s-'S3)	57 204 7,0924
17	(3p^-3P,) Cl	10,36004 104 591 12,968	**43**	Tc	58 700 7,28
18		127109,8 15,760	44	Ru (4d'5s—sfb)	59410 7,366
19		35009,81 4,34070	45	Rh (**4d**«5s-<**'fg**/2)	60 200 7,46
20		49306,0 6,1132	46	Pd **(4dW-iSo)**	**67 236 8,336**
21		52 922 6,5615	47		**61106,6 7,5763**
22	Ti	55 000 6,82	48	Cd	**72540,1 8,9939**
23	V	54 360 6,74	49	In	**46670,11 5,7864**
24	Cr	54 570 6,766	50	Sn	**59232,7 7,3440**
25	Mn	59959,4 7,43402	51		**69431,4 8,60840**
26	Fe	63 740 7,9024	52	те	72 670 9,010
			53	I	84295,0 10,451
			54	**Xe**	97833,8 12,1299
			55	Cs	31406,47 3,89391

Продолжение табл. 17.16 Продолжение табл. 17.17

Атомный номер Z	Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм»	Оптический предел. СМ-i; потенциал ионизации, эВ	Атомный номер Z	Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)	Оптический предел, см"*; потенциал ионизации, эВ
56	Ba	42034,90 5,21166	80		84184,1 10,4376
57	La	44 980 5,577	81	Tl	49266,7 6,1083
58	Ce	44 670 5,539	82	Pb	59819,6 7,4167
59	Pr	44 100 5,47	83	Bi	58 762 7,2853
60	**Nd**	44 560 5,525	84	Po	67885,3 8,4168
61	Pm	45 000 5,58	**85**	**At**	9,0
62	Sm	45 520 5,644	**86**	Rn	86 692 10,75
63	Eu	45 735 5,6704	**87**	**Fr**	32848 4,073
64	Gd (4f5d6s2—sD»)	49 603 6,150	88	Ra	**42573,4** **5,2785**
65	Tb	47 300 5,864	89	Ac	42 000 5,2
66		47 900 5,939	90	Th	49000 6,1
67	Ho	48 570 6,022	91	Pa	47 ООО 6,0
68	Er	49 260 6,108	92	и *(bP&dls^-^Ll)*	49 960 6,194
69	Tm	49 880 6,184	93	**Np**	50 540 6,266
70	Yb (4/M6**S**2-1**So**)	50 441 6,254	94	Pu	49 ООО 6,06
71	**Lu**	43762,4 5,426	95	Am	48 300 6,0
72	Hf *(Sd^s^—^Fz)*	55 600 6,8	96	Cm (5/^6d7s^—	48 600 6,02
73	Ta	63 600 7,89	97	Bk	50 200 6,23
74	W	64 000 7,98	98	Cf	50800 6,30
75	Re	64 ООО 7,88	99	Es	51800 6,42
76	**OS**	70 450 8,73	100	Fm	52 ООО 6,5
77	Ir	73 000 9,05	101	**Md**	53 000 6,6
78	Ft (5d96s—2£)з)	72 300 8,96	102	No	54 ООО 6,6
79	Au	74409,0 9,2256			

Таблица 19.2. Потенциал ионизации атомных ионов ($2 < Z < 36$), эВ (X: — спектроскопический символ иона, где I — . Z ~ N - \ - \, УУ — число электронов в системе)

Атомный номер Z	Элекеит X	с					
		и	in	IV		VI	VII
2	He	54,418					
3	Li	75,641	122,45				
4	Be	18,211	153,90	217,72			
5	B	25,155	37,931	259,38	340,23		
6	C	24,384	47,89	64,49	392,09	490,00	
7	N	29,602	47,45	77,47	97,891	552,07	667 05
8	O	35,118	54,936	77,414	113,90	138,12	739,34
9	F	34,971	62,71	87,14	114,24	157,164	185,19
10	Ne	40,963	63,46	97,12	126,2	157,9	207,28
	Na	47,287	71,620	98,92	138,40	172,2	208.5
12	Me	15,035	80,144	109,27	141,27	186,5	224,9
13	Al	18,829	28,448	119,99	153,83	198,48	241,44
14	Si	16,346	33,493	45,142	166,77	205,3	246,5
15	P	19,770	30,2026	51,444	65,026	220,42	263,6
16	S	23,338	34,83	47,305	72,7	88,05	280,9
17	CI	23,814	39,61	53,47	67,8	97,0	114,20
18	Ar	27,630	40,911	59,81	75,0	91,01	124,32
19	K	31,63	45,81	60,91	82,7	99,4	117,6
20	Ca	11,872	50,913	67,3	84,5	108,8	127,2
21	Sc	12,800	24,757	73,49	91,7	110,7	138,0
22	Ti	13,58	27,49	43,27	99,30	119,53	140,8
23	V	14,66	29,31	46,71	65,28	128,1	150,6
24	Cr	16,50	31,0	49,2	69,5	90,64	160,2
25	Mn	15,640	33,67	51,2	72,4	95	119,3
26	Fe	16,188	30,65	54,8	75	99	124,88
27	Co	17,084	33,5	51,3	79,5	102	129
28	Ni	18,169	35,3	54,9	76	108	133
29	Cu	20,293	36,84	57,4	80	103	139
30	Zn	17,964	39,72	59,57	83	108	134
31	Ga	20,515	30,726	64,2	90	117	147
32	Ge	15,935	34,2	45,715	93,5	120	151
33	As	18,59	28,4	50,1	62,6	128	154
34	Se	21,16	30,82	42,95	68	81,7	155,33
35	Br	21,81	35,90	47,3	59,7	88,6	103
36	Kr	24,360	36,95	52,5	65	78,5	111

Продолокение табл. 19.2

Атомный номер Z	Элемент X	с						
		VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
8	O	871,42						
9	F	953,91	1103,13					
10	Ne	239,10	1195,8	1362,21				
11	Na	264,2	299,87	1465,1	1648,71			
12		266,0	328,2	367,5	1761,8	1962,68		
13		284,60	330,1	399,4	442,0	2086,0	2304,2	
14	Si	303,5	351,1	401,4	476,4	523,4	2437,7	2673,2
15	P	309,6	372,1	424,4	479,5	560,8	611,7	2816,9
16	S	328,2	379,1	447,1	504,8	564,7	651,6	707,2
17	CI	348,9	400,1	455,6	529,3	592,0	656,7	749,8
18	Ar	143,46	422,4	478,7	539,0	618,3	686,1	755,7
19	K	154,7	175,82	504	564,7	629,4	714,6	786,6
20	Ca	147,2	188,3	211,28	591,9	657,2	726,6	817,6
21	Sc	158,1	180,0	225,1	249,84	687,4	756,7	830.8
22	Ti	170,4	192,1	215,92	265	291,50	787,8	863,1
23	V	173,4	205,8	230,5	256	308	336,3	896,0
24	Cr	184,7	209,3	244,4	271	298	354,8	384,2
25	Mn	194,5	221,8	248,3	286,0	314,4	343,6	403, Oi
26	Fe	151,06	234	2G2,1	290	331	361	392

Продолжение табл. 416.S

Атомный номер Z	Элемент X	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
27	Co	158	186,1	275	305	336	379	411
28	Ni	162	193	225	321	352	384	430
29	Си	166	199	232	266		401	435
30	Zn	174	203	238	274	311	420	454
31	Ga	179	214	248	284	321	358	475
32	Ge	183	217	255	291	330	369	409
33	As	187	222	259	300	338	379	421
34	Se	191	227	264	304	347	388	431
35	Br	192,8	232	270	310	352	398	441
36	Kr	125,94	230,9	275	316	358	403	451

Атомный номер Z	Элемент X	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI
l5	P	3069,87						
l6	S	3223,9	3494,2					
l7	Cl	809,4	3658,4	3946,3				
l8	Ar	854,8	918,0	4120,7	4426,2			
l9	K	861,1	98S	1033,4	4610,9	4934,1		
20	Ca	894,5	974	1037	1157	5128,9	5469,9	
21	Sc	927,5	1009	1094	1213	1288,0	5674,9	6033,8
22	Ti	941,9	1044	1131	1221	1346	1426	6249,1
23	V	976	1060	1168	1260	1355	1486	1571
24	Cr	ion	1097	1185	1299	1396	1496	1634
25	Mn	435,6	1133	1244	1317	1437	1539	1644
26	Fe	457	489,3	1262	1360	1470	1582	1690
27	Co	444	512,0	546,6	1397	1486	1603	1735
28	Ni	464	499	571,3	607,0	1541	1648	1756
29	Cu	484	520	557	633	671	1690	1793
30	Zn	490	542	579	619	698	737	1846
31	Ga	510	546	596	637	677	765	807
32	Ge	533	568	607	658	701	744	836
33	As	462	594	630	670	724	769	813
34	Se	475	519	657	695	736	793	839
35	Br	486	533	579	724	762	806	864
36	Kr	497	545	593	642	794	833	878

Атомкый номер Z	Элемент X	KXU	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII
22	Ti	6625,8						
23	V	6851,3	7246,1					
24	Cr	1721	74S2	7894,8				
25	Mn	1788	1880	8141	8571,9			
26	Fe	1800	1960	2046	8828	9277,7		
27	Co	1846	1962	2119	2219	9544	10012,1	
28	Ni	1894	2011	2131	2295	2399	10 290	10 775
29	Cu	1905	2045	2173	2298	2460	2585	11062
30	Zn	1953	2070	2216	2350	2479	2647	2780
31	Ga	2010	2120	2242	2393	2533	2668	2840
32	Ge	880	2180	2294	2421	2577	2723	2863
33	As	910	957	2357	2474	2606	276«	2920
34	Se	886	987	1036,3	2542	2661	2798	2965
35	Br	913	961	1068	1119	2733	2855	2997
36	Kr	939	989	1039	1151	1205	2931	3056

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

Атомный номер Z	Элемент X	XXIX	XXX	XXXI	XXXII	XXXIII	XXXIV	XXXV	XXXVI
29	Си	11 568							
30	Zn	11 865	12 389						
31	Ga	2982	12 696	13 239					
32	Qe	3041	3192	13 550	14 119				
33	As	3065	3248	3409	14 440	15 029			
34	Se	3123	3274	3463	3633	15 370	15 968		
35	Br	3170	3334	3490	3684	3865	16315	16 937	
36	Kr	3203	3381	3551	3712	3912	4105	17 290	17 936

Таблица 19.3. Потенциал ионизации одно-, двух- и трехзарядных тяжелых атомных ионов (37 < Z < 92), эВ
(x; — спектроскопический символ иона)

Атомный номер Z	Элемент X	C		
		II	III	IV
37	Rb	27,290	39,2	52,2
38	Sr	11,030	42,88	56,28
39	Y	12,24	20,525	60,61
40	Zr	13,13	23,1	34,419
41	Nb	14,32	25,0	37,7
42	Mo	16,16	27,2	46,4
43	Tc	15,26	29,5	—
44	Ru	16,76	28,5	—
45	Rh	18,08	31,1	—
46	Pd	19,43	32,9	—
47	Ag	21,49	34,8	—
48	Cd	16,908	37,47	—
49	In	18,87	28,0	57,0
50	Sn	14,632	30,50	40,74
51	Sb	16,53	25,32	44,16
52	Te	18,6	27,96	37,42
53	I	19,131	33,0	—
54	Xe	20,98	31,0	45
55	Cs	23,1575	33,4	46
56	Ba	10,004	35,8	47
57	La	11,1	19,18	49,9
58	Ce	10,8	20,20	36,76

Продолжение табл. 19.3

Атомный номер Z	Элемент X	c		
		II	III	IV
59	Pr	10,6	21,62	38,98
60	Nd	10,7	22,1	40,4
61	Pm	10,9	22,3	41,0
62	Sm	11,1	23,4	41,4
63	Eu	11,24	24,9	42,7
64	Gd	12,1	20,6	44,0
65	Tb	11,5	21,9	
66	Dy	11,7	22,8	41^4
67	Ho	11,8	22,8	42,5
68	Er	11,9	22,7	42,7
69	Tm	12,1	23,7	42,7
70	Yb	12,18	25,05	43,6
71	Lu	13,9	20,96	45,25
72	Hf	14,9	23,3	33,4
78	Pt	18,56		
79	Au	20,5	34	43
80	Hg	18,76	34,2	46
81	Tl	20,43	29,85	—
82	Pb	15,033	31,94	42,33
83	Bi	16,70	25,56	45,3
	Ra	10,15		
89	Ac	11,75	20	
90	Th	11,9	18,3	28,7
92	IJ	11,9	20	37

Таблица 19.4. Потенциал ионизации молекул/Р

Продолжение табл. 19.4

Молекула	*IP,* эВ	Молекула	*IP.* эВ
1. Двухатомные молекулы			
AgF	11,4(B)	BC	10,5 (C)
AlCl		BF	11,1
AlF	Й (C)	BH	9,8(
AlO	9,5 (C)	Ю	13,5(C)
A IS	9,5 (C)	BSi	7,8 (C)
AlTe	9,0 (C)	BaCl	5,0 *B)*
	14,5 (Л)	BaF	4,9 *C)*
Arkr	13,4 (Л)	BaO	6,9 *C)*
ArXe	12,0 (Л)	BeF	9,1 (C)
Asa	12(C)	BeH	8,2 (B)
	8,3 (C)	BeO	10,1 fC)
AuBr	9.2 (C)	&	10,52(Л)
AuSi	8.3 (C)		11,1 (B)
BrF	11,8 (B)	C1,	11,50(Л)
BrO	10,3 (Л)	ClF	12,7 (B)
C2	12,15 (Л)	ClO	11,0(B)
CP	9,20 (B)	CoO	9,0 (C)
CH	10,64 (Л)	CrF	8,4 (C)
CN	14,2 (Л)	CrO	8,4 (C)
CO	14,014 Л)	Cs.	3,64 (B)
c s	11,33 (Л)	CsBr	
CaF	6,0 (C)	CsCI	
CaH	5,9 (B)	CsF	8,8 (B)
CaCl	6,0 (B)	Csl	7,25 (Л)
CaO	6,5 (C)	Cua	7,4 (B)
CeO	4,9 (C)	**D.**	15,467(Л)

Продолжение табл. 17.16

MnF	**8.7 (C)**
MoO	**8,0 (C)**
No	**15,581** *(A)*
NF	**12.3(B)**
NH	**13,1(Л)**
NO	**9,264 (Л)**
NS	**8,9 (B)**
	4,90 (Л)
NaBr	**8.3 (B)**
NaCl	**8,93 (Л)**
Nal	**7,64 (Л)**
NaLi	**4,9 (B)**
NaK	**4,6 (C)**
NdO	**5,0 (D)**
NiCl	**11.4 (B)**
NiO	**9,5 (C)**
	12,071 (Л)
gb	**12,9(Л)**
OH	**12,9 (Л)**
OT	**12,9 (Л)**
fe	**10.5 (Л)**
Ptt	**10.5 (C)**
TO	**10.6 (B)**
	8,2 (B)'
PbBr	**7.8 (C)**
PbCl	**7,5 (C)**
PbF	**7.5 (C)**
PbO	**9.0 (C)**
PbS	**8.6 (C)**
PbTe	**8.2 (C)**
	7.7 (C)
PdO	**9.1 (C)**
PdSi	**8.4 (C)**
PrO	**4.9 (C)**
PtB	**10(D)**
PtSi	**7,9 (C)**
	3,45 (B)
RbBr	**7,7 (B)**
RbCl	**8.3 (B)**
Rbl	**7,1 (B)**
RhO	**9.3 (C)**
RuO	**8,7 (C)**
	9,356 (Л)
IH	**10,4 (Л)**
SO	**10,29 (Л)**
	9.0 (C)
	8,88 (Л)
	9,06 (Л)
Si,	**7.4 (C)**
SiC	**10,2 (B)**
SiF	**7,26 (Л)**
SiO	**11.4 (Л)**
SnBr	**7,4 (C)**
SnCl	**6.6 (C)**
SnF	**7,4 (C)**
SnO	**10.5 (C)**
SnS	**9.7 (C)**
SnSe	**9,7 (C)**
StiTe	**9.1 (C)**
SrCI	**5,6 (B)**
SrF	**4,9 (C)**
SrO	**6,1 (C)**
	15,487 (Л)
Йо	**6,0 (C)**
Te^	**8,29 (Л)**
TeO	**8,7 (B)**
T|r	**6.3 (C)**
TЮ	**6.4 (C)**
TiS	
TIBr	9Л4^Л)
TlCl	**9,70 (Л)**
TIF	**10,5 (B)**
Til	
fe	**5.0 (D)**
WO	**9.1 (D)**
uc	**6.2 (C)**
UN	**7.0 (C)**
ЦО	**5,7 (B)**
us	**6.3 (C)**
	11,13 (Л)
	7,9 (C
	6.1 C)

2. Трехатомные молекулы

BrCN	**9,5** *(B)*
ccu	**9.6 C)**
CFa	**8.5 (B)**
CHr	**7.0 (C)**
CO,	**7.1 (C)**
COS	**7.6 (C)**
CS^	**9.5 (D)**
CaCI,	**4,0(5)**
CICN	**8.4(6)**
	8.2 (C)
S	**4.7 (B)**
CsOH	
FQM	***П^87(А)***
GeBr,	**4,9 (B)**
GeCl,	**5,145 (Л)**
GeF^	**10.0 (C)**
HCN	**10.1 (C)**
	7.7 (C)
r j	**И.3(С)**
	7,85 (B)
N4f	**8.6 (C)**
NH^	**4,9 (B)**
I	**8.4 (B)**
	7.5 (B)
SiC,	**7.8 (C)**
SiF,	**7.4(C)**
SiO,	
SnClz	

Продолжение табл. 17.17

SrCla	**9,7 (B)**
UO,	**5,5 (B)**
XeF,	**12,42 (Л)**

3. Четырехатомные молекулы

	10,68 (Л)
ВС'з	**11,73 (Л)**
	15,95 (Л)
ЕЙ	**11,4 (С)**
Blз	**9,40 (Л)**
CHз	
C2H2	
	10,9 (C)
	12,6 (B)
	10,15(Л)
	9,71 (Л)

4.Пятиатомные молекулы

	11,0(B)
	11,47 (Л)
	12,31(Л
	11,77 (Л
CH4	**12,98 (Л**
CH,Ci,	**11,35(Л)**
CHзBr	**10,53(Л)**
	9,538 (Л)
Si^I	И.**4 (C)**
SnBr^	**11,0 (Л)**
SnCU	**12,10 (Л)**
XeF4	**12,65 (Л)**

5. Шестиатомные молекулы

C,CU	**9,34 (Л)**
C,F4	**10,12(Л)**
C,H4	**10,51 (Л)**
CH30H	**10,85(Л)**
N,F4	**12,0 (Л)**
N,H4	**8,74 (Л)**

6- Более сложные молекулы

SF,	**15,7 (Л)**
	14,14 (Л)
	12,19(Л)
	11,41 (Л)
	11,50 (Л)
QHbBr	**10,29 (Л)**
QHsOH	**10,47 (Л)**

Таблица **3.5 Энергия связи электронов из внутренних оболочек свободных атомов, эВ**

I. Z = 34- 18

Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона		Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона				
Т ^ Г Т		к		1	is	i1 M.
^"3/2					^"3/2	
64,40		1079	70,9	38,46	38,0	
123,6		1311,3	96,5	57,6	57,6	
201	12,93	1567	126	81	80	10,62
296	16,59	1844	154	104	104	13,46
403		2148	191	135	134	16,15
538		2476	232	170	168	20,20
694	37,86	2829	277	208	206	24,59
870,27	48,47	3206	326,37	250,6	248,6	29,24

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент Bl							электрона		
		K	Lt	Lr	u	Ml			Mt	Ah	w,
		'^1/2			^"3/2						
19	K	3614	384	303,3	300,7	37	24,82	24,49			
20	Ca	4048	447	360	356	48	34,7	34,3			
21	Sc	4494	503	408	404	56	• 33	33			
22	Ti	4970	567	465	459	64	39	38			
23	V	5470	633	525	518	72	44	43			
24	Cr	5995	702	589	580	80	49	48			
25	Mn	6544	755	656	652	89	55	53			
26	Fe	7117	851	726	713	98	61	59			
27	Co	7715	931	800	785	107	68	66			
28	Ni	8338	1015	877	860	117	75	73			
29	Cu	8986	1103	958	938	127	82	80			
30	Zn	9663	1198	1052	1029	141	98,7	96,1			
31	Ga	10371	1302	1146	1119	162	111	107	21	20	11,87
32	Ge	11107	1413	1261	1220	184	130	125	33	32	14,28
33	As	11871	1531	1362	1327	208	151	145	46	45	18,96
34	Se	12662	1656	1479	1439	234	173	166	61	60	22,19
35	Br	13481	1787	1602	1556	262	197	189	77	76	23,80
36	Kr	14327	1923	1731	1678	293	222	214,6	95,0	93,8	27,51

III. 2 = 37-^-54

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона														
		K	Lt	L,		M,		JIl3	Mt		Ni	N2		Ni		0.
					^"3/2			^"3/2	^3/2							
37	Rb	15203	2068	1867	1807	325	254,3	245,4	117,4	116	114	21,77	20,71			
38	Sr	16108	2219	2010	1943	361	288	278	144	142	40	29,2	28,2			
39	Y	17041	2375	2158	2083	397	315	304	163	161	48	30	29			
40	Zr	18002	2536	2311	2227	434	348	335	187	185	56	35	33			
41	Nb	18990	2702	2469	2375	472	382	367	212	209	62	40				
42	Mo	20006	2872	2632	2527	511	416	399	237	234	68	45	42			
43	Tc	21050	3048	2800	2683	551	451	432	263	259	74	49	45			
44	Ru	22123	3230	2973	2844	592	488	466	290	286	81	53	49			

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона														
		K			***и***			*M,*	***M.***	*Ms*	*N.*		Л-,	*N,*	•Vj	0.
					^"3/2											
45	Rh	23225	3418	3152	ЗОЮ	634	526	501	318	313	87	58	53			
46	Pd	24357	3611	3337	3180	677	565	537	347	342	93	63	57			
47	Ag	25520	3812	3530	3357	724	608	577	379	376	101	69	63			
48	Cd	26715	4022	3732	3542	775	659	625	419	412	112	78	71	18,28	17,58	
49	In	27944	4242	3943	3735	830	707	669	455	447	126	90	82	21	20	11,03
50	Sn	29204	4469	4160	3933	888	761	719	497	489	141	102	93	29	28	13,10
51	Sb	30496	4703	4385	4137	949	817	771	542	533	157	114	104	38	37	16,86
52	Te	31820	4945	4618	4347	1012	876	825	589	578	174	127	117	48	46	17,84
53	I	33176	5195	4858	4563	1078	937	881	638	626	193	141	131	58	56	20,61
54	Xe	34561	5453	5107	4787	1149	1002	941	689	677	213,3	157	145,5	69,5	67,5	23,40

IV. Z = 55 -

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой вылетающего электрона																
		K	Ix	*Lz*	*L,*			*Ms*					*Ns*			O,	0,	OB
					2^3/2			^"3/2	^^3/2					^"3/2	^"5/2			^"3/2
55	Cs	35987	5717	5362	5014	1220	1068	1005	746	732	233	174	164	81	79	25	19,07	17,21
56	Ba	37442	5991	5626	5249	1293	1138	1063	797	788	254	193	181	101	98,4	31	24,8	22,8
57	La	38928	6269	5894	5486	1365	1207	1124	851	834	273	210	196	105	103	36	22	19
58	Ce	40446	6552	6167	5726	1437	1275	1184	903	885	291	225	209	114	111	39	25	22
59	Pr	41995	6839	6444	5968	1509	1342	1244	954	934	307	238	220	121	117	41	27	24
60	Nd	43575	7132	6727	6213	1580	1408	1303	1005	983	321	250	230	126	122	42	28	25
61	Pm	45188	7432	7017	6464	1653	1476	1362	1057	1032	335	261	240	131	127	43	28	25
62	Sm	46837	7740	7315	6720	1728	1546	1422	1110	1083	349	273	251	137	132	44	29	25
	Eu	48522	8056	7621	6981	1805	1618	1484	1164	1135	364	286	262	143	137	45	30	26
64	Gd	50243	8380	7935	7247	1884	1692	1547	1220	1189	380	300	273	150	143	46	31	27
65	Tb	51999	8711	8256	7518	1965	1768	1612	1277	1243	398	315	285	157	150	48	32	28
66	Dy	53792	9050	8585	7794	2048	1846	1678	1335	1298	416	331	297	164	157	50	33	28
67	Ho	55622	9398	8922	8075	2133	1926	1746	1395	1354	434	348	310	172	164	52	34	29
	Er	57489	9754	9267	8361	2220	2008	1815	1456	1412	452	365	323	181	172	54	35	30
69	Tm	59393	10118	9620	8651	2309	2092	1885	1518	1471	471	382	336	190	181	56	36	30
70	Yb	61335	10490	9981	8946	2401	2178	1956	1580	1531	490	399	349	200	190	58	37	31
71	Lu	63320	10876	10355	9250	2499	2270	2032	1647	1596	514	420	366	213	202	62	39	32
72	Hf	65350	11275	10742	9564	2604	2369	2113	1720	1665	542	444	386	229	217	68	43	35
73	Ta	67419	11684	11139	9884	2712	2472	2197	1796	1737	570	469	407	245	232	74	47	3&
74	W	69529	12103	11546	10209	2823	2577	2283	1874	1811	599	495	428	261	248	80	51	41
75	Re	71681	12532	11963	10540	2937	2686	2371	1953	1887	629	522	450	278	264	86	56	45
76	Os	73876	12972	12390	10876	3054	2797	2461	2035	1964	660	551	473	295	280	92	61	49
77	Ir	76115	13422	12828	11219	3175	2912	2554	2119	2044	693	581	497	314	298	99	66	53
78	Pt	78399	13883	13277	11567	3300	3030	2649	2206	2126	727	612	522	335	318	106	71	57
79	Au	80729	14356	13738	11923	3430	3153	2748	2295	2210	764	645	548	357	339	114	76	61
80	Hg	83108	14845	14214	12288	3567	3283	2852	2390	2300	809	686	584	385	366	134	90	72
81	Tl	85536	15350	14704	12662	3710	3420	2961	2490	2394	852	726	615	411	391	139	98	79
82	Pb	88011	15867	15206	13041	3857	3560	3072	2592	2490	899	769	651	441	419	153	111	90
83	Bi	90534	16396	15719	13426	4007	3704	3185	2696	2588	946	813	687	472	448	167	125	101

Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона

		M.				*Мэ*	*M,*	*Мб*	*N,*	*N^*	*N,*	*N^*	*N^*	*N.*	*N-,*	*O.*	*O^*	*O,*	*O.*
84	Po	9310E	16933	16242	13815		3300	**2800**		992	855								
	At	9573C	17485	16780	14213		3415	2905		1043	902								
		9840C	18053	17335	14615		3535	3015		1095	950								
		10113£	18640	17905	15030		3660	3135		1155	1005								
		10392C	19240		15450		3790	3253		121	1062								
		10676C	19850		15875		3920	3375		1275	1118	93C							
		10965E	20475	19700	16305	4835	4050	3495	3337	1335	173	972							
		11260C	21115	20320	16735	2 5007		3610	344£	1390	1228	101C							
		11560E	21763	20953	17170	5185				1445									
		11867E	22432	21605	17615	5370	4440			1505									
		121795	23103	22270	18062	5545	4560	3975	378C	1565									

19.3. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВНУТРЕННИХ ОБОЛОЧКАХ АТОМОВ

В табл. 19.5 представлены значения энергии связи электронов, заполняющих внутренние оболочки атомов,— минимальной энергии, затрачиваемой на вырывание электронов из замкнутых внутренних оболочек. После отрыва электрона от атома образующийся ион может оказаться в различных состояниях. Взаимодействие между валентной электронной оболочкой и внутренней .оболочкой с вакансией приводит к огносительно небольшому расщеплению эне] п 1 Tl X с тояний. Приведенные в табл. 19.5 значения энергии связи электронов соответствуют образованию наинизшего по энергии состояния иона.

Энергии связи электронов соответствуют свободным атомам, т. е. отнесены к нулевому потенциалу вакуума. В случае проводящих твердых тел измеряемые значения энергии связи электронов в атомах относятся к уровню Ферми соответствующего проводника. Для пересчета искомой энергии к вакуумному уровню в этом случае требуется к измеренному значению прибавить работу выхода элемента, которая для металлов изменяется в диапазоне от 1,93 эВ (цезий) до 5,36 эВ (платина) и составляет в среднем около 4 эВ.

Наиболее точный метод измерения энергии связи электронов во внутренних оболочках атомов (погрешность ^ ± 0 , 1 эВ)[4] основан на рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии газообразных веществ. Кроме того, искомые энергии определяют методами фотопоглощения, рентгеновской эмиссии, оже-спектроскопии и т. д.

В верхней графе табл. 19.5 указаны символы электронных иодоболочек атомов, отвечающие разным главным квантовым числам электрона, его орбитальному и полному моментам. При отборе материала для этой таблицы были использованы работы [6,9—16]. Погрешность определения искомых значений энергии учитывалась нами при округлении значащих цифр в пределах .±1н-±3 для последней приведенной цифры.

19.4. ЭНЕРГИЯ СРОДСТВА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ К ЭЛЕКТРОНУ

Энергией сродства ***EA*** к электрону называют энергию связи электрона в соответствующем отрицательном ионе — минимальную энергию, затрачиваемую на отрыв электрона от атома или молекулы В случае молекулярных частиц иод величиной ***EA*** следует понимать энергию, отвечающую переходу между основными колебательными состояниями частиц.

В табл. 19.6 представлены значения энергии сродства атомов к электрону. Наиболее точные современные методы измерения этой величины основаны на анализе иорогового поведения сечения лазерного фотоотрыва и лазерной фотоэлектронной спектроскопии [17—20]. В отдельных графах табл. 19.6 приведены электронная конфигурация валентной оболочки иона и соответствующий терм отрицательного иона.

В табл. 19.7 собраны значения ***EA*** двухатомных и более сложных молекулярных частиц. Среди наиболее надежных методов определения этой величины отметим фотоэлектронную спектроскопию, фотоотрыв, перезарядку ионов и столкновительную ионизацию [17, 18, 21, 22].

Для того чтобы дать представление о точности измерения величины ***EA*** для атомов и молекул, мы распределили числовые значения но четырем классам точности: Л—погрешность ^ 1 % ; В — ^ 3 % - , С—<^ 1 0 % ; D- ^ 3 0 % , в соответствии с оценкой исиользованного метода их получения.

19.5. ЭНЕРГИЯ СРОДСТВА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ К ПРОТОНУ

Энергия сродства к протону ***(PA)*** соответствует энергии, выделяющейся при присоединении к нейтральному атому или молекуле протона (Н+), и является основной характеристикой газофазных процессов перехода протона при столкновениях частиц в низкотемпературной плазме. Универсальное определение искомой величины ***PA*** основано на рассмотрении гипотетической реакции

ири этом энергия сродства молекулы X к протону равна изменению энтальпии с обратным знаком для написанной реакции, или если воспользоваться понятием теплоты образования AHf частиц X, Н+ и XH+, получим

$$PA\ (X) = ДЯ^{o}\ (X) + ДЯ^{o}\ (H^{-}) - ДЯ,o(X№);$$

Таблица 19.6. Энергия сродства атомов к электрону *(EA)*

Атомный номер *Z*	Отрицательный ион (электронный терм)	Конфигурация внешней электронной оболочки	ЯЛ. эВ
1	H- (IS)	Ь-а	0,75421 (Л)
2	He- (V)	Is2s2p	0,077 (B)
3	Li- eS)		0,618 (Л)
5	B- eP)		0,28(C)
6			1,263 (Л)
		2s22p3	0,035 (B)
8	0- *ep)*		1,46112 (Л)
9	F- (IS)		3,40 (Л)
И	Na- (IS)	3s2	0,5479 (Л)
13	АГ(3Po)		0,44 (B)
	Al- CD,)		0,33 (B)
14	Si- ("S)		1,39 (Л)
	Si- *m*	3/^	0,52 (B)
	Si- eP)	3p3	0,03 (B)
15	P- (3P)	3/^	0,746 (Л)
16	S- eP)	3p^	2,07712 (Л)
17	CI- (IS)	Ър^	3,62 (Л)
19	K- (IS)	4s2	0,5015 (Л)
21	Sc- (IO)	3d4sMp	0,19 (C)
	Sc- (^D)	3d4sHp	0,04(0)
22	Ti- *m*	3d34s2	0,08 (D)
23	V- *m*	3d4s^	0,53 (C)
24	Cr- (=S)	3d4s^	0,67 (B)
26	Fe- (V)	3d'4s2	0,15 (B)
27	Co- *m*	3d84s2	0,66 (B)
	NT m		1,16(Л)
29	Cu- (IS)		1,23(Л)
31	Ga- eP)		0,3 (D)
32	Ge- *eS)*	4pB	1,23 (Л)
33	As- *m*		0,80 (C)
34	Se- eP)		2,021 (Л)
35	Br- (IS)		3,37 (Л)
	Rb- (IS)		0,4859 (Л)
39	Y- (iči)	АйЪя^*Ър*	0,31 (C)
	Y- (IO)	АйЪз^*Ър*	0,16 (O)
40	Zr- ("f)		0,43 (B)
41	Nb- (=£1)		0,89 (B)
42	Mo- (®S)		0,75 (B)
43	Tc- *eo)*		0,6 *(Z)*)
44	Ru- *eF)*	4d'5s2	1,1 (O)
45	*Rh-m*	4d85s2	1,14 (Л)
46	pd- *m*	4ds5s2	0,56 (B)
47	Ag- (IS)	4^10552	1,30 (Л)
49	In- PP)		0,3 *(D)*
50	Sn- (^S)		1,11 (Л)
51	Sb- (3P)	5/^	1,1 (C)
52	Te- *i^P)*		1,971 (Л)
53	I- (^S)	5pB	3.059 (Л)
55	Cs- (IS)		0,4716 (Л)
57	La- *i'^F)*		0,5 (D)
73	Ta- (^D)		0,32 (C)
74	W- (OS)	5dS6s2	0,82 (Л)
75	Re- (6£i)	5de6s2	0,15 (D)
76	Os- (ф=)	5d'6s^	1,4 (D)
77	Ir- ^*F)*		1,57 (Л)
78	Ft- CD)	5d96s2	2,13 (Л)
79	Au- (IS)	5di06s2	2,3086 (Л)
81	Xl- (3p)	*6p*^	0,3 (D)
82	Pb- (^S)		0,37 (B)
&3	Bi- *i^P)*		0,95 (B)
84	Po- *CP)*		1,9 (£))
85	At- (IS)		2,9 (D)

Таблица 19.7. Энергия сродства молекул к электрону *{EA)*

Двухатомные молекулы		Трехатомные молекулы	
	2,42 (C)	AlFa	2,3 (C)
ЙЬ	3,6 *(C)*	AlO2	4.1 (C)
AsBr	1,3 (C)	AsBr^	3,5 (C)
AsCl	1,3 (C)	*AsCl*^	2.2 (C)
AsF	1,3 (C)	**AsF,**	0.8 (D)
AsH	1,0 (D)	AsHa	1,27 (B)
BO	3,0 (C)	BFa	2.2 (C)
	0,3 (D)		4.0 (C)
	0,7 *{D)*		2.5 (C)
	1,8(C)	**I :**	2.1 *{D)*
	2.6 (C)	C2H	3,73 (B)
	3,39 *(B)*	CH2	0,65 (Л)
CBr	1.7 (C)	**CNS**	2,0 (C)
CF	3,3 (C)	**COS**	0,5 (D)
CH	1,24 *(A)*		0,85 (D)
CN	3,82 (Л)	C0H2	1,45 (Л)
cs	0,21 (C)	**FCN**	4.0 (D)
CaH	0,93 (C)	FeHa	1.05 (B)
	2,44 (B)	GeF^	1.3 (O)
S i	2,0 (D)	**HNO**	0,34 (C)
CsCl	0,45 (B)	**LiCN**	0,74 *{D)*
	2,96 (B)	**LiNC**	0,62 (D)
Elo	1,49 (B)	**LiOH**	0,22 (D)
	2,51 (B)	MnHa	0,44 (C)
	2,6 (C)	*NCO*	2.6 *(D)*
ICl	2.8 (C)	NH^	0,757 (B)
KBr	0,64 (B)		1.7 (D)
KCl	0,58 (B)	no'	2,42 (B)
KI	0,73 (B)	N,0	0,24 *(D)*
	0,7 *(D)*	NiHa	1,93 (Л)
Lib	0,59 (B)		2,103 (A)
LiF	0,44 (C)	**Й**	0,9 *(D)*
LiH	0,3 (D)		1,27 (Л)
LiN	0,4 ф)		1.4 (C)
	1,05 (C)		
	0,3744 (Л)		
NO	0,03 *(D)*	**SH,**	1.1 (C)
NS	1,19 (Л)		1.11 *(Л)*
NaBr	0,79 (B)	**IS**	
NaCl	0,73 *(B)*	**SeCN**	
NaF	0,52 (B)	SiHg	1.12 (B)
NaT	0,86 (B)	**SiCN**	2,6 (C)
NaH	0,32 *(D)*	SiHa	1,12 (6)
	0,440 (B)		
	1,8277 (Л)		
OD	1,8255(Л)		
	0,59 (C)	**Четырехатомные молекулы**	
fe	1,03 (Л)		
PO	1.09 (B)	**CCl3**	1,2 (D)
RbCl	0,54 (B)		1,92(C)
	1,66 (B)		1,07 (B)
i-P	2,5 (C)	**CO3**	2,82 (B)
SH	2,31 (Л)	GeFa	3,0 (D)
so	1.09 (C)	FeFs	3,6 (C)
SeH	2,2125(Л)	MnFg	4,4 (C)
SeO	1,46 (B)	NO3	3,7 (B)
SiH	1,28 (Л)	**PBr3**	1,6 (D)
TeH	2.10 (Л)	PBr^Cl	1,6 (D)
ZnH	0,95 *(D)*	PBrCla	1,5 (C)
			0,8 (Л)
		POCI,	3.8 (C)
		SF3	2,9 (C)
		SO3	1,7 (C)
		SO,F	2,8 (C)

Продолжение табл. 19.7

Молекула	*EA,* эВ
SiFg	2,7 (C)
SiHs	1,4 ***(D)***
XJFS	1,5 (D)
Пятиатомные молекулы	
CCl3F	1,1 ***(D)***
CCl2F2	0,4 ***(D)***
CD3O	1,55 (B)
&	2,0 (D)
	0,9 (E>)
	2.4 ***(D)***
	1.5 (C)
CF3O	1,4 ***(D)***
CF3S	1,8 (D)
CH3Br	0,4 ***(D)***
CH3O	1,57(5)
CH3S	1,6 (D)
CO_2	1,22 (C)
LiCHa	0,24 ***(D)***
CeF4	3,6 (C)
FeF4	5,4 (C)
HNO3	0,6 (E>)
MnFi	5,3 (C)
OH • H2O	1,95 (C)
POCl3	1,4 (D)
PtF^	5,2 (C)
SF4	2,35 ***(B)***
UF4	1,7 ***(D)***
Шестиатомные и более сложные молекулы	
C3F3	4,0 ***(D)***
C3H3	2,3 (D)
M0F5	3,3 (C)
PtFb	6,5 (C)
SFs	3,7 (C)
UF5	4,0 (C)
C2Cl5	1,6 (D)
C_F5	2,2 (C)
C2H5	0,89 (C)
	i V r
	4,3 (C)
й	4,2 (C)
OsFg	4,1 ***(D)***
	8,0 (C)
ReFe	3,9 (D)
SFe	0,55 (C)
SeFe	3,0 (C)
TeFe	3,3 (B)
UF,	5,0 ***(B)***
WFe	4,3 (C)
C3F5	2,2 ***(D)***
C,H,0	0,6 (D)-
C3H5S	1,4 (D)
Fe^Fe	4,4 (C)
C4F6	1,0 (D)
C,H,N	1,0 (D)
C3F7	2,2 (C)
C3H,	0,6 (D)
C5H6	1,79 ***(B)***
CeCl6	2,8 (C)
	2!74 (C)
CeHs	2,3 (C)
CeFe	0,5 (D)

Таблица 19.8. **Энергия сродства атомов к протону** *(PA)*

АТОМ	*PA,* эВ	Атом	*PA,* эВ
Ar	3,87 ***(A)***	**I**	6,31 (B)
Br	5,73 (B)	Кг	4,41 (B)
CI	5,34 (B)	N	3,4 (O
Cs	7,59 (B)	Ne	2,08 (B)
F	3,42 ***(A)***	0	5,1 (B)
H	2,651 ***(A)***	S	6,87 (B)
He	1,845 ***(A)***	Xe	5,15 (B)
		Zn	6.77 (B)

Таблица 19.9. Энергия сродства молекул к протону *(PA)*

Молекула	*PA,* эВ	Молекула	*PA,* эВ
	Двухатомные молекулы		
CO	6,15 (Л)	HI	6,3 (C)
CN	5 ***(D)***		
CS	8,2 (Л)	HS	7,2 (C)
H2	4,40 (B)	**N2**	4,8 (C)
	4,56 (B)	NH	6.1 (C)
	6,10 (Л)	**No**	5,50 (B)
HCl	5,86 (B)		4,10 (B)
HF	4,09 (B)	**8f,**	6.2 (C)
	Трехатомные молекулы		
CH,	8,6 (B)	H^Se	7,4 (B)
		H^Te	7,6 (B)
	7,46	**NHa**	8,1 (B)
H2O	7,23 (B)	NO2	6,6 (B)
HOa	6,4 (C)	N,0	5,8 (B)
HaS	7,4 (B)	PH2	7,2 (C)
		SiHa	8,7 (B)
	Четырехатомные и более сложные молекулы		
	5,5 (C)	**CHaC!**	6,9 (C)
a -	5,4 (C)	**CH4**	5,4 (B)
H,CS	8.0 (Л)	**CeH4**	7,1 (B)
HNo2	8.1 (C)	**HNO3**	7,5 (B)
	5,2 (C	**SiH4**	6,6 (B)
i ,"	6,6 (C	**TiCU**	7,6 (B)
kH,	8,9 ***(A***		6,6 (B)
	7,9 (C		5,8 (C)
PHa	8,07 (Л)	**SFe**	3,7 (C)
SO3	6,2 (B)	**C^He**	6,9 (B)
CP,	5,2 (C)		

здесь теплота образования отнесена к элементам в их стандартных состояниях.

Основные методы определения ***PA*** основаны на измерении константы равновесия для реакций с передачей протона путем использования масс-спектрометров высокого давления, ионного циклотронного резонанса или проточной техники исследования послесвечения плазмы и др. [23—25].

В табл. 19.8 включены значения ***PA*** для атомов, которые соответствуют энергии диссоциации молекулярного иона гидрида из основного колебательного состояния. В табл. **19.9** представлены значения ***PA*** для ряда простейших молекул, распространенных в газовой фазе. Основная информация об энергии сродства атомов и молекул к протону содержится в [22—25]. Чтобы дать представление о погрешностях в измерении ***PA,*** мы распределили числовые данные по четырем классам точности: *А* — погрешность %; ***B*** — %; С 10%; ***D*** — ^ 3 0 % .

19.6. ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ЭЛЕКТРОНАМИ

Сечение t-кратной ионизации **o'+** есть отношение вероятности образования в единицу времени иона кратности I к плотности потока электронов. Сечение полной ионизации a_+ связано с **o'+** соотношением $0_+ = 0+ \cdot f \cdot f202 + +303 + +,..$ При энергии электронов, меньшей порога двукратной ионизации, o_+ совпадает с a^-. Полное сечение ионизации определяет вероятность образования в единицу времени полного (суммарного) положительного

Таблица **19.10. Константы *a, b и c* эмпирической формулы (19.2) для сечений ионизации оболочек атомов. Постоянная *n* может принимать значения 4, 5, 6 и 7 для s-оболочек; 4,5 и 6 для p-оболочек; 5 и 6 для d-оболочек; 4 и 5 для /-оболочек, константа *a* имеет единицу Ю-i^ см^- эВ^**

Константа	***Is***	ls2	***2p***		2/73	***2p^***	***2p^***	2p≤	***3d***		3 #	3 #	3d5	3^e	3d'	3d«		3^l»
a	4	4	3,8	3,5	3,2	3,0	2,8	2,6	3,7	3,4	3,1	2,8	2,5	2,2	2,0	1.8	1,6	1,4
	0,60	0,75	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96
c	0,56	0,50	0,4	0,3	0,25	0,22	0,20	0,19	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13

Константа	2s	2s2	3p	3/Я	Зрз			***Sff***	***id***		4d⁼		***id^***	4d«	4 d'	4d8	4d»	4d">
a	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3,8	3,5	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0
b	0,3	0,5	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,6	0,3	0,45	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92	0,93	0,94
c	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,45	0,4	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15

Константа	3s	3s^	***np***	***np^***	/грз	***np^***	«р»		***nd***	***nd^***	***nd^***	***nd^***	***nd^***	***nd^***	***nd-'***	nrfs	nd®	ndw
a	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4
b	0	0,3	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0	0,2	0,3	0,45	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92
c	0	0,6	0	0	0,6	0,6	0,6	0,5	0	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,17

Константа	***ris***		***If***	***nГ***	***np***	***nf^***	***np***	***nP***	***np***	***np***	***nP***	***npo***	n / "	***np^***	n/13	
b	4	4	3,7	3,4	3,1	2,8	2,5	2,2	2,0	1.8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
	0	0	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
c	0	0	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11

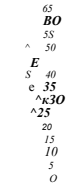
заряда и в случае ионизации молекул включает также диссоциативную ионизацию электронами.

При энергии электронов £, значительно превышающей потенциал ионизации Va. оболочки а атома, сечение ионизации описывается соотношением Бете [26, 27]

(19.1)

где «к — константа, значение которой, как показывает гоавнение с экспериментом, при £> Va может изменяться от 2,6 до 4,5-10-'® см2 • оВ^ [27]; <?а —число эквиалентных электронов на оболочке а Формула Бете лежит в основе многих эмпирических соотношений, используемых для аппроксимации сечении ионизацнн атомов. Наиболее часто для сечений однократной ионизации атомов из основного состояния используется аппроксимация, предложенная Лотцем [27, 28]:

X { 1 — 1) 1 1 , (19.2)



10^ £,эВ

Рис. 19.1. Сечение ионизации Н (относительная погрешность ±7%) [31]



Рис. 19.2. Сечение ионизации Не:
» - [32]; О - 133]

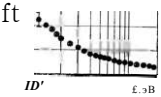


Рис. 19.6. Сеченне ионизации Кг:
О - [32]; • - [33]

Рис. 19.3. Полное сечение ионизации Не из метастабильиого состояния 2^8 [34]

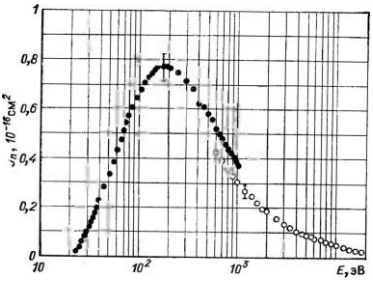


Рис. 19.4. Сечение ионизации Ne:
• - 132]; о - [33]

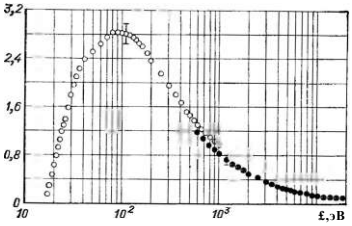


Рис. 19.5. Сечение ионизации Ar:
О - [32]; • - 133]

S

2.4

Г'

o,e

Рис. 19.7. Сечение ионизации Xe;
О - [321; • - Г33]

где Оа , Ьа и Са — постоянные для данной оболочки, определяемые из сравнения с экспериментом. В табл. 19.10 приведены эти постоянные для различных оболочек атомов [28]. Погрешность аппроксимации составляет 40—30% [28], она может превышать эти значения вблизи порога ионизации и максимума сечения. Аппроксимация не учитывает вклад в суммарное сечение ионизации возбуждения автоионизационных состояний атомов. На рис. 19.1—19.34 приведены значения сечения для элементов н молекул.

Удобные для практического использования аппроксимации результатов расчетов в борновском приближении сечений и скоростей ионизации ряда атомов и атомарных ионов приведены в монографиях Л. А. Вайнштейна и др. [29. 30].

• m r

S k i s

x10

£

I S

^ =

80 120 160 E,эВ 0 40 80 120 IB0 £,ЭВ

Рис 19.8. Сечение многократной ионизации инертных газов [35]

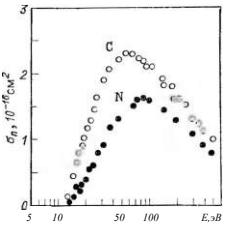


Рис. 19.9. Полные сечения ионизации C и N [36]

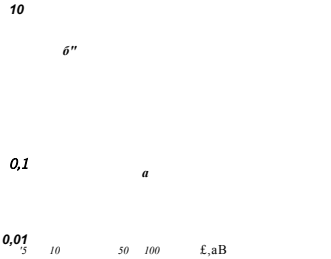


Рис. 19.11. Сечения ионизации S [38]

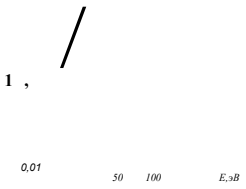


Рис. 19.10. Ссчения ионизации O:
-136]: -[37]

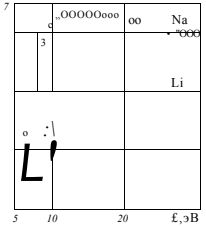


Рис. 19.12. Полные сечения ионизации Li н Na [39]

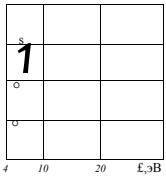


Рис. 19.13. Полное сечение ионизации K [39]

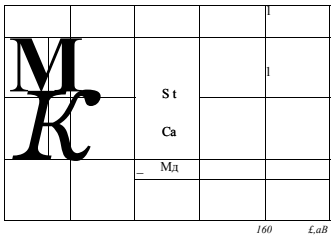


Рис. 19.16. Полные сечения ионизации щелочноземельных металлов [42]

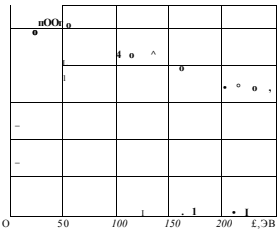


Рис. 19.14 Полное сечение ионизации Rb [40]

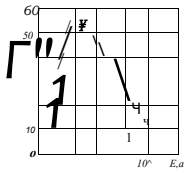


Рис. 19.17. Полное сечение ионизации Hg (относительная погрешность ±20%) [43, 44]

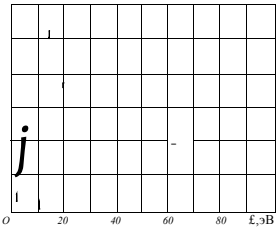


Рис 1.15. Полное сечение ионизации Cs [41]

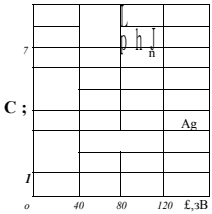


Рис. 19.18. Полное сечение ионизации Pb и Ag [45]

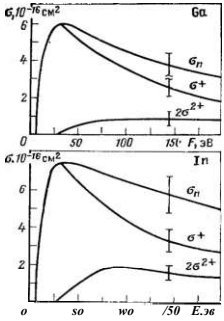


Рис. 19.19. Сечение ионизации Ga и In [46]

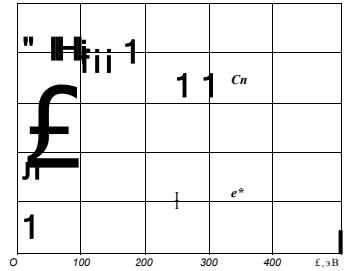


Рис. 19.20. Сечение полной и однократной ионизации U [47]

5 10 50 100 E,эВ

Рис. 19.21. Сечение многократной ионизации U [47]

[0,5

0,2

I I

10' 10^ 10*E,эВ

Рис. 19.22. Полное сечение ионизации H>:
O - 13-,. • „ [331

0, 6

т Ч .

o

10^ 10^ E,эВ

Рис. 19.23. Полное сечение ионизации N2:
O - [321; • [33]

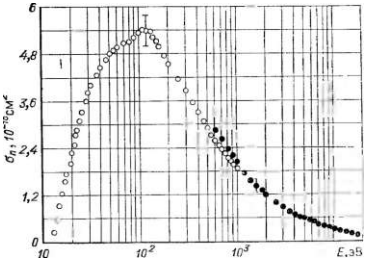


Рис. 19.24. Полное сечение ионизации Uj:
O - [3-,.. • - [33]

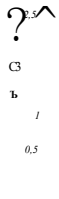


Рис. 19.25. Полное сечение ионизации CO и NO [32]

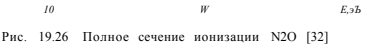


Рис. 19.26 Полное сечение ионизации N2O [32]



Рис. 19.27. Полное сечение ионизации CO2 и CH4 [32]

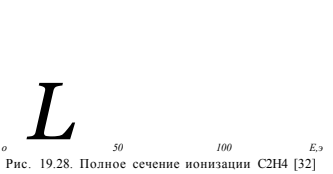


Рис. 19.28. Полное сечение ионизации C2H4 [32]

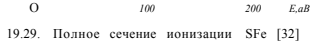


Рис. 19.29. Полное сечение ионизации SFe [32]

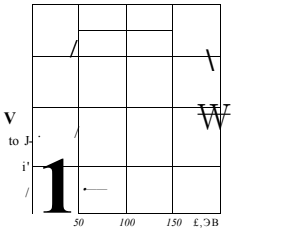


Рис. 19.30. Сечение полной и диссоциативной ионизации SO2 [48]

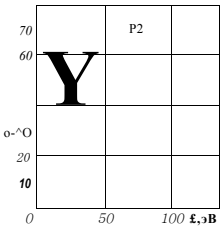


Рис. 19.31. Сечение ионизации Ра [49]

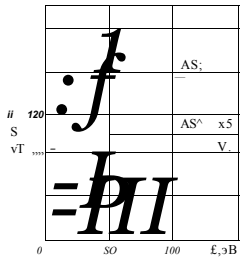


Рис. 19.34. Сечение ионизации As, [49]

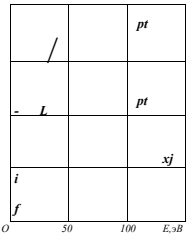


Рис. 19.32. Сечение ионизации Р4 [49]

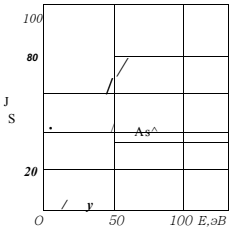


Рис. 19.33. Сечение ионизации As2 [49]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Edien B. Atomic spectra//Spectroscopy I/Ed. by S. Flugge. Encyclopedia of Physics. Berlin: Springer. 1964.

2. iVloore C. E. Ionization potentials and ionization limits derived from optical spectra/Nat. Stand. Ref. Data Ser. Nat. Bur. Stand. Vol. 34 Washington: NBS, 1970.

3. Martin W. C, Zalubas R., Hagan L. Atomic energy levels. The rare-earth elements/Nat. Stand. Ref. Data Ser. Nat. Bur. Stand. Vol. 60. Washington: NBS, 1978.

4. Worden E. P., Conway J. G. Multistep laser photoionization of the lanthanides and actinides//Lanthanide and Actinide Chemistry and Spectroscopy. Amer. Chem. Soc. Symp Series 131/Ed. by **N. M.** Edelstein. Washington: Amer. Chem. Soc. 1980. Chap 19. P. 381--425.

5 Kelly R. L. Atomic and ionic spectrum lines below 2000 A (H through Ar)/Preprint ORNL-5922. Oak Ridge, Tennessee, Oct. 1982.

6. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и атомных ионов. М.: Энергоатомиздат. 1986.

7. Хьюбер К. П., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул: Пер. с англ./Под ред. Н. Н. Соболева. М.: Мир. 1984.

8. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону/Л. В. Гурвич, Г. В. Карачевцев, В. Н. Кондратьев и др.; Под ред. В. **Н.** Кон- . М.: Наука, 1974.

9. Карлсон Т. А. Фотоэлектронная и оже-спектроскопия: Пер. с англ. Л.: Машиностроение. 1981. Приложение I.

10. Shirley D. A., Martin R. L., Kowalczyk S. P. e. a.// Phys. Rev. 1977. Vol. B15. P. 544—552.

11. Mehlhorn W., Breuckmann B., Hausamann D.// Phys. Scripta. 1977. Vol. 16. P. 177- 185.

12. Porter F. T., Freedman M. S.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1978. Vol. 7. P. 1267.

13. Sevier K. D.//Atom. Data Nucl. Data Tabl. 1979. Vol. 24. P. 323—371.

14. Fuggle J. C., Martensson N.//J. Electron Spectr. Relat. Phenomena. 1980. Vol. 21 P. 275.

15. Siegbahn H., Karlsson L. Photoelectron spectroscopy//Encyclopedia of Physics. Vol. 31/Ed. by W. Mehlhorn. Berlin: Springer. 1982. P. 215—467.

16. Jolly W. L., Bomben K. D., Eyermann C. J.//Atom. Data Nucl. Data Tabl. 1984. Vol. 31. P. 433—493.

17. Месси Г. Отрицательные ионы: Пер. с англ. М.: Мир, 1979.

18. Смирнов Б. М. Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978.
19. Hotop H., Lineberger W. C.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. Vol. 4. P. 539—576; 1985. Vol. 14. P. 731—750.
20. Mead R. D., Stevens A. E.. Lineberger W. C. Photodetachment in negative ion beams//Gas Phase Ion Chemistry/Ed. by M T. Bowers. N. Y.: Academic, 1984. Vol. 3. Chap. 22.
21. Drzaic P. S., Marks J., Brauman J. I. Electron photodetachment form gas phase molecular anions//Ibid. Chap. 21.
22 Christodoulides A. A., McCorkle D. L., Christophorou L. G. Electron affinities of atoms, molecules, and radicalsZ/Electron—Molecule Interactions and Their Applications/Ed. by L. G. Christophorou. N. Y., Lond.: Academic, 1984. Vol. 2. P. 423—641.
23. Walder R., Franklin J. L.//Intern. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 1980. Vol. 36. P. 85.
24. Lias S. G., Liebman J. F., Levin R. D.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1984. Vol. 13. P. 695.
25. Raksit A. B., Bohme D. KV/Intern. J. Mass Spectrom. Ion Proc. 1984. Vol. 57. P. 211.
26. Bethe H. A.//Ann. Phys. 1930. Vol. 5. P. 325.
27. Lotz W.//Z. Phys. 1967. Vol. 206. P. 205—211.
28. Lotz W.//Ibid. 1970. Vol. 232. P. 101—107.
29. Вайнштейн Л. А., Собельмаи И. И., Юков Е. А. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: Наука. 1973
30. Вайнштейн Л. А., Собельмаи И И., Юков Е. А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.: Наука. 1979.
31. Bell K. L., Gilbody H. B., Hughes J. G. e. a/У J. Phys. Chem. Ref. Dat. 1983. Vol. 12. P. 891—916.
32. Rapp D., Englander—Golden P.//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43. P. 1464—1479.
33. Schram B. L., De Heer F. J., Van der Wiel M. J., Kistemaker J.//Physica. 1965, Vol. 31. P. 94—112.
34. Dixon A. J., Harrison M. F., Smith A. C. H.// J. Phys B: Atom, and Molec. Phys. 1976. Vol. 15. P. 2617—2631.
35. Stephan K., Helm H.. Mark T. D. J. Chem. Phys. 1980. Vol. 73. P. 3763—3778.
36. Brook E., Harrison M. F. A., Smith A. C. H.// J. Phys. B: Atom, and Molecular. Phys. 1978. Vol. 11. P. 3115—3123.
37. Ziegler D. L, Newman J. H., Smith K. A., Stebbings R. F.//Plant. and Space Sci. 1982. Vol. 30. P. 451-456.
38. Ziegler D. L., Newman J. H., Goeller L. N. e. a.// Ibid. P. 1269—1274.
39. Запесочный И. И., Алексахин И. С. Ионизация атомов щелочных металлов медленными электронами// Журн, эксперим. и теорет. физ. 1968. Т. 55. С. 76—85.
40. Nygaard K. J., Hahn Yu. B.//J. Chem. Phys. 1973. Vol. 58. P. 3494—3499.
41. Nygaard K. J.//Ibid. 1968. Vol. 49. P. 1995—2002.
42. Вайнштейн Л. А., Очкур В. И., Раховский В. И., Степанов А. М.//Журн. эксперим. и теорет, физ. 1971. Т. 61. С. 511—519.
43. Kieffer L. J., Dunn G. H.//Rev. Mod. Phys. 1966. Vol. 38. P. 1—35.
44. Lotz W.//Astrophys. J. Suppl. 1967. Vol. 14. P. 207—219.
45. Павлов С. И., Раховский В. И., Федорова Г. М., Журн, эксперим. и теорет. физ. 1967. Т. 52. С. 21—28.
46. Головач Д. Г., Раховский В. И., Шустряков В. М. //Измерительная техника. 1986. № 2. С. 52—53.
47. Halle J. C., Lo H. H., Fite W. L.//Phys. Rev. 1981. Vol. 23A. P. 1708—1716.
48. Orient O. J., Srlvastava S. K.//J. Chem. Phys. 1984. Vol. 80. P. 140—143.
49. Monnom G., Gancherel Ph., Paparoditis C.//J. Phys. 1984. Vol. 45. P. 77—84.

ГЛАВА 20

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

Л. *в.* ***Елецкий***

20.1. ДИФФУЗИЯ И ПОДВИЖНОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

В идеальной слабоионизованной плазме, где степень ионизации удовлетворяет условию Ne/Na<^ (кТе/Яу)^ ***(Ne, Na*** — плотность электронов и нейтральных частиц соответственно; Те — температура электронов; Ry=13,6 эВ—атомный масштаб энергии), диффузия заряженных частиц (электронов и ионов) определяется в основном парными соударениями этих частиц с нейтральными частицами (атомами и молекулами). При этом плотность «ейтральных и заряженных частиц должна удовлетворять критериям идеальности

^20.1)

(20.2)

где ***е*** — заряд электрона; ***к*** — постоянная Больцмана; Щ — размер атома. При малых значениях напряженности электрического поля, когда средние энергии заряженных и нейтральных частиц различаются несущественно, коэф-<)ициент диффузии заряженных частиц ***D*** связан с их подвижностью К соотношением Эйнштейна

(20.3)

Подвижность заряженных частиц К определяется соотношением ***К=w/E,*** где И)—дрейфовая скорость заряженных частиц в электрическом поле напряженностью ***Е.*** При высокой напряженности электрического поля ***Е,*** когда функция распределения заряженных частиц отличается от максвелловской и их «температура» не имеет прямого физического смысла, соотношение (20.3) справедливо приближенно, с погрешностью 10—15%, если при этом под «температурой» заряженных части1^ попимать величину, связанную с их средней энергией ***ē*** соотношением ^ = В плазме, основной механизм проводимости которой связан с движением электронов под действием электрического поля, подвижность электронов ***Ke*** связана с проводимостью плазмы а соотношением

Ke = (20.4)

Соотношения (20.3), (20.4) позволяют определить коэффициент диффузии электронов на основании данных по электропроводности слабоионизованной плазмы.

Если характерный размер, на котором заметно изме-

18. Смирнов Б. М. Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978.
19. Hotop H., Lineberger W. C.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. Vol. 4. P. 539—576; 1985. Vol. 14. P. 731—750.
20. Mead R. D., Stevens A. E., Lineberger W. C. Photodetachment in negative ion beams//Gas Phase Ion Chemistry/Ed. by M T. Bowers. N. Y.: Academic, 1984. Vol. 3. Chap. 22.
21. Drzaic P. S., Marks J., Brauman J. I. Electron photodetachment form gas phase molecular anions//Ibid. Chap. 21.
22 Christodoulides A. A., McCorkle D. L., Christophorou L. G. Electron affinities of atoms, molecules, and radicalsZ/Electron—Molecule Interactions and Their Applications/Ed. by L. G. Christophorou. N. Y., Lond.: Academic, 1984. Vol. 2. P. 423—641.
23. Walder R., Franklin J. L.//Intern. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 1980. Vol. 36. P. 85.
24. Lias S. G., Liebman J. F., Levin R. D.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1984. Vol. 13. P. 695.
25. Raksit A. B., Bohme D. KV/Intern. J. Mass Spectrom. Ion Proc. 1984. Vol. 57. P. 211.
26. Bethe H. A.//Ann. Phys. 1930. Vol. 5. P. 325.
27. Lotz W.//Z. Phys. 1967. Vol. 206. P. 205—211.
28. Lotz W.//Ibid. 1970. Vol. 232. P. 101—107.
29. Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: Наука. 1973
30. Вайнштейн Л. А., Собельман И И., Юков Е. А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.: Наука. 1979.
31. Bell K. L., Gilbody H. B., Hughes J. G. e. a/У J. Phys. Chem. Ref. Dat. 1983. Vol. 12. P. 891—916.
32. Rapp D., Englander—Golden P.//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43. P. 1464—1479.
33. Schram B. L., De Heer F. J., Van der Wiel M. J., Kistemaker J.//Physica. 1965, Vol. 31. P. 94—112.
34. Dixon A. J., Harrison M. F., Smith A. C. H.// J. Phys B: Atom, and Molec. Phys. 1976. Vol. 15. P. 2617—2631.
35. Stephan K., Helm H.. Mark T. D. J. Chem. Phys. 1980. Vol. 73. P. 3763—3778.
36. Brook E., Harrison M. F. A., Smith A. C. H.// J. Phys. B: Atom, and Molecular. Phys. 1978. Vol. 11. P. 3115—3123.
37. Ziegler D. L, Newman J. H., Smith K. A., Stebbings R. F.//Plant. and Space Sci. 1982. Vol. 30. P. 451-456.
38. Ziegler D. L., Newman J. H., Goeller L. N. e. a.// Ibid. P. 1269—1274.
39. Запесочный И. И., Алексахин И. С. Ионизация атомов щелочных металлов медленными электронами// Журн, эксперим. и теорет. физ. 1968. Т. 55. С. 76—85.
40. Nygaard K. J., Hahn Yu. B.//J. Chem. Phys. 1973. Vol. 58. P. 3494—3499.
41. Nygaard K. J.//Ibid. 1968. Vol. 49. P. 1995—2002.
42. Вайнштейн Л. А., Очкур В. И., Раховский В. И., Степанов А. М.//Журн. эксперим. и теорет, физ. 1971. Т. 61. С. 511—519.
43. Kieffer L. J., Dunn G. H.//Rev. Mod. Phys. 1966. Vol. 38. P. 1—35.
44. Lotz W.//Astrophys. J. Suppl. 1967. Vol. 14. P. 207—219.
45. Павлов С. И., Раховский В. И., Федорова Г. М., Журн, эксперим. и теорет. физ. 1967. Т. 52. С. 21—28.
46. Головач Д. Г., Раховский В. И., Шустряков В. М. //Измерительная техника. 1986. № 2. С. 52—53.
47. Halle J. C., Lo H. H., Fite W. L.//Phys. Rev. 1981. Vol. 23A. P. 1708—1716.
48. Orient O. J., Srlvastava S. K.//J. Chem. Phys. 1984. Vol. 80. P. 140—143.
49. Monnom G., Gancherel Ph., Paparoditis C.//J. Phys. 1984. Vol. 45. P. 77—84.

ГЛАВА 20

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

Л. *в. Елецкий*

20.1. ДИФФУЗИЯ И ПОДВИЖНОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

В идеальной слабоионизованной плазме, где степень ионизации удовлетворяет условию Ne/Na<^ (кТе/Яу)^ *(Ne, Na* — плотность электронов и нейтральных частиц соответственно; Те — температура электронов; Ry=13,6 эВ—атомный масштаб энергии), диффузия заряженных частиц (электронов и ионов) определяется в основном парными соударениями этих частиц с нейтральными частицами (атомами и молекулами). При этом плотность «нейтральных и заряженных частиц должна удовлетворять критериям идеальности

^20.1)

(20.2)

где *е* — заряд электрона; *к* — постоянная Больцмана; Щ — размер атома. При малых значениях напряженности электрического поля, когда средние энергии заряженных и нейтральных частиц различаются несущественно, коэф-<)ициент диффузии заряженных частиц *D* связан с их подвижностью К соотношением Эйнштейна

(20.3)

Подвижность заряженных частиц К определяется соотношением *К=w/E,* где И)—дрейфовая скорость заряженных частиц в электрическом поле напряженностью *Е.* При высокой напряженности электрического поля *Е,* когда функция распределения заряженных частиц отличается от максвелловской и их «температура» не имеет прямого физического смысла, соотношение (20.3) справедливо приближенно, с погрешностью 10—15%, если при этом под «температурой» заряженных части1^ попимать величину, связанную с их средней энергией *ē* соотношением ^ = В плазме, основной механизм проводимости которой связан с движением электронов под действием электрического поля, подвижность электронов *Ке* связана с проводимостью плазмы а соотношением

Ke = (20.4)

Соотношения (20.3), (20.4) позволяют определить коэффициент диффузии электронов на основании данных по электропроводности слабоионизованной плазмы.

Если характерный размер, на котором заметно изме-

Таблица 20.1. Дрейфовая скорость Wg, Ю» см/с, и отношение *eD^ /K*, эВ, для электронов в газе [1]

	He		Ne		Ar		Kr		Xe	
		.Dj^ /K		eO^/K		eD^/K		eD^/K		eDJK
0,03	0,7	0,034	1,3	—	1,2	0.94	1		0,16	
0,05	1	0,042	1,6	—	1,4	1,2	1,2		0,5	
0,07	1,3	0,051	1,8		1,5	1,3	1,2		0,74	
0,1	1,6	0,065	2,1	0,4	1.6	1,5	1,3		0,88	
0,3	2,8	0,15	3,4	0,91	2,2	2,3	1,6		1,1	
0,5	3,7	0,24	4,3	1,4	2,5	2,8	1,7		1,2	
0,7	4,3	0,32	5	1,8	2,7	3,2	1,9		l.S	
1	5,1	0,43	5,8	2,5	3	3,8	2		1,4	
3	8,8	1,2	15	5,2	4	7,2	3,2		1,8	
5	12	2,3	19	6	4,9	8,2	—		—	
7	16	3	26	6,4	7,2	8,2	—		—	
10	25	3,6	38	6,9	И	7,7	—		—	
30	68	5,3	100	—	26	7,7	—		—	
50	130	6,6	150	—	42	7,1	—		—	
70	190	7,3	200		55	6,4				
100	280	8,2	260		74	6,4	—		65	
200	580	11	460		120	6,2	—		130	
300	880	14	640		—	5,8	—		180	
500	1400	16		—		6,6	—		250	
800	1700	18	—	—	–	7,8	—		–	
1000						8,5				

EIN, 10-" В-см2	н.		*D,*		N2		O2		CO,	
0,03	0,46	0,027	0,46	0,026	1,1	0,028	2,6	—	0,054	—
0,05	0,74	0,028	0,74	0,027	1,6	0,031	3,7	—	0,095	—
0,07	1	0,029	1	0,029	2	0,035	4,1	—	0,14	0,026
0,1	1,4	0,032	1,4	0,031	2,4	0,042	4,3	—	0,19	0,026
0,3	3,1	0,046	3	0,048	3,1	0,1	5,4	—	0,54	0,026
0,5	4,3	0,059	4	0,067	3,5	0,16	7,3	—	0,89	0,026
0,7	5,2	0,074	4,7	0,088	3,9	0,20	9,2	—	1,2	0,026
	6,2	0,095	5,4	0,12	4,4	0,28	10	0,14	1,8	0,026
3	9,8	0,23	8,9	0,28	7,5	0,61	22	0,3	5,4	0,03
5	13	0,33	11	0,39	11	0,74	26	0,49	9,1	0,035
7	15	0,41	14		14	0,84	28	0,73	13	0,043
10	19	0.51	17		18	0,93	31	1,1	21	0,065.
30	37	1			42	1,2	72	2,4	120	0,99
50	57	1,7			61	1,4	ПО	2,9	130	1,7
70	83	2,2	—		79	1,5	120	3,0	130	2,4
100	130	2.7			100	1,9	160	3,4	130	3,2
200	340	3,8			200	3,4	260	—	180	4,4
300	470	4,5	—	—	290	4,2	330	—	240	5,0
500	730	5,4	—	—	420	—	450	—	320	6,5
800	960	6,5	—	—	530	—	640	—	420	7,1
1000	1200	7,1	—	–	590	—	710	—	490	7,9

EIN, 10-" В-см2	CO		NO		H2O (пар)		с н.		CF4 [2]		SFe [2]	
0,3	7,4	0,045	7,8	—	—	—	—	—	30	—	—	—
0,5	7,7	0,063	8,6	—	—	—	—	—	45	—	—	→
0,7	9	0,08	9,1	—	—	—	—	—	57	—	—	—
1	10	0,09	12	—	—	—	—	—	68	—	—	—
3	18	0,18	26	0,2	0,7	—	100	—	100	—	—	—
5	22	0,25	32	0,23	1,2	—	110	—	115	—	—	—
7	25	0,32	38	0,25	1,6	–	95		130			

Продолжение табл. 18.28 Продолжение табл. 18.29

E/N, 10-f В-см2	CO		NO		H^o (пар)		CH4		CF4 [2]		SFe [2]	
10	26	0,42	47	0,28	2,3	—	85	—	150	0,1	43	
30	39	0,82	66	0,63	7,5	—	75	—	—	0,6	53	–
50	52	1,1	84	1,1	27	—	—	–	—	1,7	77	—
70	66	1,3	—	—	58	0,022	–	—	—	3,0	86	–
90	85	1,4			ПО	0,029	–	—	150	3,7	97	–
100	96	1,6				—	74	4,9	170	4	100	–
200	230	2,8				—	150	5,2	220	5,0	160	–
300	290	3,7			—	—	190	5,1	300	5,5	190	5,1
300	430	5,1	–	–	.	–	280	5,3	I	Z	260	5,5
800							400	6,6			340	6,8
1000	–	–	–	–	–	–	470	7,8	–	—	360	–

Продолжение табл. 20.1

E/N, 10-i' В-см^^ [2]	²	N,0	*CsFs*	C4pr	*CChF,*			NHs HCl
0,1								
0,2								
0,4								0,17
0,6								0,27
0,8								0,36
		7,8						0,45
		18						0,85
		37						1,8
		53						2,7
		65						3,4
								4,4
								10
							2,6	50
							2,8	ПО
							3.0	
100							3.1	
200							3,1	
300					3,7			
400					3.7			
500					3.8			
					3.9			

няется плотность заряженных частиц плазме, много больше радиуса Дебая

1/ ***8-nNee^***

плазма является квазинейтральной, т. е. плотности положительных и отрицательных зарядов равны. При этом имеет место совместная диффузия заряже разного знака (амбиполярная диффузия) с коэффициентом диффузии ***Da,*** единым для электронов и ионов и выражающимся через коэффициент диффузии ионов и этом же газе ***Dr.***

(20.5)

где Ti и Te — температура ионов и электронов соответственно. Соотношение (20.5) выполняется с той же точностью, что и соотношение Эйнштейна (20.3).

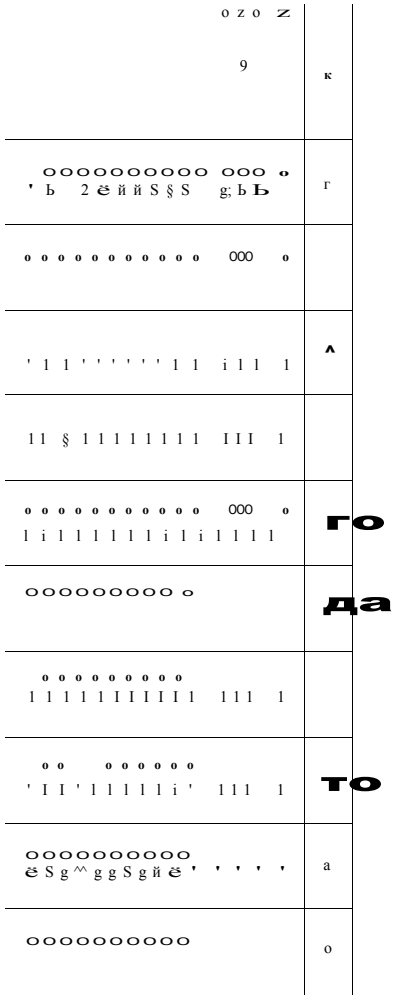
Основными характеристиками движения электронов в газе под действием электрического поля являются коэффициент поперечной диффузии Д х и дрейфовая скорость электронов We. Однако поскольку коэффициент поперечной диффузии электронов в газе является функцией плотности частиц газа, в качестве справочных обычно используют значения We и характеристической энергии электронов Se, определяемой как отношение ***D^*** к подвижности электронов ***Ke.*** Оба эти параметра являются однозначными функциями отношения напряженности электрического поля ***E*** к плотности частиц газа ***Nu.*** В табл. 20.1 приведены измеренные значения ***ёе*** и We для некоторых газов при различных значениях отношения ***EjNa.*** в табл. 20.2 представлены значения коэффициента диффузии ионов ***Di*** при атмосферном давлении и нулевом электрическом поле.

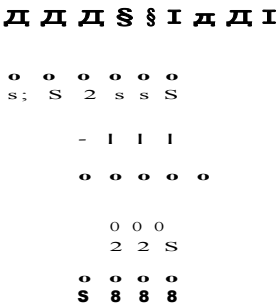
Таблица 20.2. Коэффициент диффузии ионов см=/с, в различных газах при нулевом электрическом поле и атмосферном давлении [3—7]. (В случаях, когда температура газа отлична от 300 К, ее значение указано в скобках)

Ион	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rb	Cs	Hg	H,	D.	N.				Вгз	CH4	COa
He+	0,27	0,44	—	0,116													
He;	0,43	0,24	0,098	0,076	0,059	—	—	—	0,28	—	0,098	0,103		0,094			0,078
Ne+	0,79	0,107	0,069	0,052	0,039	—	—	—	**0,27**	—	**0,073**	0,074		0,070			0,054
HeNe+	0,66	0,17															
Ne*	0,45	0,16	0,056	0,040	0,030	—	—	—	0,26	—	0,061	0, 062		0,058			C,044
Ar+	0,50	0,14	0,039	0,040	0,030	—	—	—	0,26	0,21	0,061	0, 062		0,058	0,033		0,044
Kr+	0,52	0,12	0,056	0,024	0,022	—	—	—	0,26	0,20	0,053	0,054	0, 060	0,05	0,027		0,037
Xe+	0,46	0,12	0,045	0,029	0,015			—	0,28	0,20	0,046	0,103	0,057	0,094	0,024	0,016	0,059	0,035
Ne	0,82	0,63		0,23		—	—	—	0,40	0,45	0,098	0,2	**0, 28**	0,29	0,17			0,22
D+	0,64	0,42		0,16				—	—	0,29	0,20		0,19	0,20	0, 12			0, 16
Hg+	0,51	0,154	0,056	0,030	-	-	-	0,066 (350)	-	0,20	0,055	0,54	0,055	0,063	0,023	0,015	0,058	0,037
N+	0,52	0,197	—	0,066	—	—	—		-	0,23	0,078		**0, 16**	0,17	0,049			
N2	0,49	0,22	0,059	0,047	0,034	-	—	-	0,26	0,21	-		0,15	0,063	0,037			
0+	0,54	0,19	0,089	0,062	—	—	—	—	—	0,22	0,085		0,15	**0, 16**	0,046			0,049
H2	0,64	0,42	-	0,16	-	-	—	-	-	-	0,20		0, 20	**0, 21**				
Кгэ"	-	0,14	-	0,028	0,021	-	—	-	0,29	0,20	-		0,056	0,052	0,024	0,016		
Xe^	0,36	0,12	0,043	0,026	0,019	-	—	—	0,25	0,20	0,049		0,054	0,046	0,022	0,014		0,033
Rb^	—	0,13	-	0,030	0,021	**0,016 (621)**	0,0055	0,017	0,29	0,21	-		0,056	0,056	0,023	0,015		
Cs^	—	0,13	—	0,028	0,019	**0,0066**	0,011 (625)	0.015	0,29	0,20	—		0,054	0,051	0,022	0,014		
Hg;	-	0,13	-	0,027	0,018	0,0063	0,0047	0,019 (500)	0,29	0,20	-		0,054	0,050	0,021	0,013		
Нз'	0,78	0,35	—	0,13	0,104	—	—		0,39	0,30	—		0,17	0,16				
D3	—	0,26	—	0,096	0,074	—	—	—	0,33	0,21	—		**0, 12**	0,14	0,071	0,058		
	—	0,15	—	0,043	0,032	—	—	-	0,30	0,21	-		0,068	0, 062	0,032	0,024		
N:	—	0,15	—	0,039	0,028	—	—	—	0,29	0,21	0,058		0,063	0,059	0,030	0,022		
Ba+	—	0,14	—	0,031	0,022	—	—	0,018	0,018	0,20	0,06		0,057	0,053	0,024	0,016		
0:	—	0,14	—	0,038	0,027	—	—	— ,	0,29	0,21	0,053	0,049	**0,062**	0,058	0,029	0,021		
H-	1,02	0,58	—	0,23	0,18	0,053	0,047	0,16	0,50	0,45	—	0,056		**0,26**	0,17			
0 -	0,75	0,19	—	0,062	0,047	0,014	0,0125	0,041	0,30	0,22	-	0,83			0,046			0,05
	0,56	0,16	—	0,047	0,035	0,011	0,0093	0,030	0,33	0,22	-	0,056	0,071		0,035			
03	0,48	0,15	0,63	0,041	0,030	0,0095	0,0080	0,026	0,29	0,21	-	0, 066	0,065	0, 061	0,031			
04'	—	0,14	—	0,038	0,027	0,0087	0,0072	0,023	0,29	0,20	—	0,056		0,058	0,029			
co-	—	0,15	0,62	0,038	0,028	0,0089	0,0074	0,023	0,29	0,20	-	0,065	0,063	0,058	0,029			0,033
co-	0,43	0,14	-	0,036	0,026	0,0083	0,0068	0,021	0,29	0,20	-	0,063	0.060	0,056	0,027			0,032
on	0,F5	0,21	0,067	0,015	0,032	—	—	—	0,26	—	0,063	0,058		0, 060	0,035	0,027		0,048
Lr	0,63	0,25	0,12	0,096	0,072	0,021	0,018	—	0,32	0,25	0,102	0,105		0,098	0, 066	0,054		0,082
	1 o;56	0,205	0,078	0,057	0,042	0,012	0,011	-	0,32	0,23	0,073	0,071			0,04	0,031	0,067	0,057

Продолжение табл. 21.21

Ион	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rb	Cs	ITg	Ha	Da	N.	O2	NO	GO	SFe	CI,	Br,	CH4	CO,
K+	0,53	0,187	0,069	0,048	0,034	0,010	0,0086	—	0,33	0,24	0,065	0,069	0,U58	U,059	—	u,u33	U,025	0,066	0,037
Rb»	0,52	0.169	0,058	0,038	0,026	0,0097 (M1)	0,0066	–	0,33	–	0,058	0,062	–	0,05	–	0,027	0,019	–	0,032
Cs+	0,48	0,153	0,054	0,034	0,023	0,0073	0.0065 (628)	—	0,33	—	0,057	0,057	—	0,052	—	0,025	0,016	—	0,029
U+	0,41	—	—	–	—	0,0067		—	—	–	—	—	—	—	–	0,023	0,014	–	–
SF;	0,24	–	–	–	–	–	0.0057	–		.	–	0,052	–	–	0,014	–	–	0,056	–
SF;	0,28	–	–	–	–		0,0059	–	–	–		0,057	–	.	0,015	–	–	0,056	--
Arl	0,37	0,12	0,0475	0,031	0,023		—	—	0,26	—	0,054	0,054	—	0,051	—	0,027	0,019	0,061	—
H2O+	0,53	0,20	0,069	–	–	–		–	–	–	–	–	–	–	—	0,044	0,035	0,077	–
	0,55	0,18	0,087	–	–	–		–	0,33	–	0,071	–			–	0,043	0,034	0,076	–
HsOj	0,45	0,16	0 ® (337)		—	—		—	—	—	0,U79	—	—	—	—	0,038	0,026	0,067	—
	0,36	0,15	0,064 (337)				–	–		–	0,055		—	—	—	0,030	0,022	0,063	
He04		0,14	0,058 (337)			;	0,0076									0,028	0,020	0,062	
ReO;	–	0,13	0,05	–	–	–	0,0051	–	–	.	–	–	–	.	–	0,028	0,014	0,058	.
Re04	–	0,13	0,043	–	–	–	0,0051	–	–	–	–	–	–	–	–	0,024	0,014	0,058	–
WO3	—	0,13	0,051	—	–	—	0,0054	-	—		–	—	—		—	0,027	0,014	0,058	—
N0+	0,54	0,15	0,061	0,046	0,033	–	–	–	0,26	–	0,065	0,067	0,049	0,062	–	–	–	–	0,048
	0,51	–	0,069	0,050	0,037									0,045		–	–	–	–
N A	–	–	0,057	0,038	0,028														
CaOl	—	—	0,062	0,039	0,028														
c+	—	–	0,092	0,070	0,054	—	–	–	–	–	–	–	–	0,070	–	–	–	–	–
(SFe);	–	–	0,047	0,028	0,019	–	0,0056	–	–	.	–	–	–	.	0,012	–	–	–	–
(SFe);	–		0,046	0,027	0,018	–	0,0047	.	–	.	.	–	–	–	0,011	–	–		–
He:	0,12 (77)		0,092	0,039															
ci;	–	–	0,055	0,037	0.026		0,0070												
Brз	—	—	0,049	0,031	0,021	—	0,0055												
Br-	0,49	.	0,058	0,035	0,025	–	0,0067	.	–	–	–	–	–	–	.	0,083	.	–	.


o z o z
9
к
' Ь 2 ё й й S § S g; Ь Ь
г
' 1 1 ' ' ' ' ' ' 1 1 i l l 1
^
1 1 § 1 1 1 1 1 1 1 1 I I I 1
l i l l l l l l i l i l l l l
го
o o o o o o o o o
да
1 1 1 1 1 I I I I I 1 1 1 1
' I I ' l l l l l i ' 1 1 1 1
то
ё S g ^^ g g S g й ё ' ' ' ' '
a
o


д д д § § I д д I
s ; S 2 s s S
- l l l
2 2 S
S 8 8 8

20.2. ВЯЗКОСТЬ СЛАБОИОНИЗОВАННОП ПЛАЗМЫ

Вязкость слабоионизованной плазмы, состоящей из нейтральных частиц, электронов и положительных ионов, может отличаться от вязкости нейтрального газа. При этом электроны, имеющие малую массу, практически ни при каких условиях не вносят заметного вклада в перенос импульса и их ролью в вязкости плазмы можно пренебречь. Вклад ионов в вязкость становится существенным уже при малой степени ионизации, поскольку сечение обмена импульсом, происходящего при столкновениях иона с атомом и обусловленного процессом резонансной перезарядки иона на атоме, существенно превышает сечение передачи импульса при соударениях атомов. Согласно элементарной кинетической теории зависимость вязкости плазмы т] от ее параметров дается следующим выражением

$$\eta = \frac{\Gamma}{Q_{упр} + Q_{рез}\sqrt{2}}$$

где Г — температура плазмы; М —масса атома; Оупр— сечение упругого рассеяния при столкновении атомов, приводящего к передаче импульса; Орез — сечение резонансной перезарядки иона на атоме; N^, N^ - плотность ионов и атомов соответственно. В равновесной плазме отношение NiIN^ является функцией давления и температуры плазмы, что и определяет зависимость вязкости плазмы от ее параметров.

При малых степенях ионизации плазмы, когда вкладом ионов в вязкость можно пренебречь, вязкость плазмы растет с ростом температуры. Поскольку обычно Срез » Оупр, при Ni/Na ~ Оудр/Орез « 1 зависимость вязкости от температуры имеет максимум. В табл. 20.3 приведены максимальные значения вязкости для равновесной плазмы инертных газов. В табл. 20.4—20.7, рис. 20. 1 приводятся значения вязкости равновесной плазмы инертных газов, воздуха и Cs при различных давлении и температуре [8—11]. Погрешность приводимых данных 10—30%.

Таблица 20.3. Максимальные значения вязкости плазмы инертного газа т]тах и соответствующей температуры Гтах [8, 9]

Газ	*р.* Па	Гтах, К	*Nl/Na*	Па-с
Ar	10к	7800	0,069	3,0-10-^
	106	8600	0,058	3,4-10-^
	106	10 200	0,048	3,9-10-^
Kr	106	10 000	0,060	3,3-10-^
Xe	106	9000	0,067	3,4.10-*

Таблица 20.4. Вязкость плазмы гелия и аргона при атмосферном давлении и различной температуре [8, 9], Па.с

Г, 103 К	2	3	4	6	Ю	И	12
He	0,72	- 1,3	1,6	1,8 2,1	2,4	2,9	2,9 3,2 3,3
Ar	0,82	1.1 1.3	1,6	1.9 2,1	2.4	2.7	2.9 3.0 —

Таблица 20.5. Вязкость плазмы ксеяона при различных давлении и температуре [8, 9], 10"^ Па-с

р. Па	Температура, К				
	6000	7000	8000	9000	1000
10^	2,6	2,9	3,0	2,7	1,7
106	2,6	3,0	3,3	3,4	3,2
10в	2,6	3,0	3,3	3,6	3,9

Таблица 20.6. Вязкость плазмы воздуха при атмосферном давлении и различной температуре [10]

Г, 103 К	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
т], 10-^ Па-с	0,7	1,2	1,8	2,4	2,8	2,1	1,2	0,6	0,3	0,1

Таблица 20.7. Вязкость частично ионизованного пара Cs при различных давлении и температуре [11]

317	386	406	413	412	412
6,85	3,88	398	480	561	583
3,34	6,64	19.6	49,5	224	488
5,58	7,93	11.7	**18,8**	66,8	226
11,6	15,0	19,4	25,4	37,7	80,5
26,0	31,4	38,2	48,1	63,2	91,0

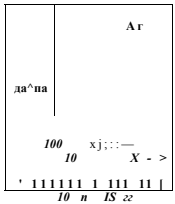


Рис. 20.1. Вязкость равновесного частично ионизованного аргона при различных давлении и температуре

20.3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА

Перенос тепла в ионизованном газе осуществляется как за счет нейтральных, так и заряженных частиц. При этом в слабоионизованном газе вклад положительных ионов в теплопроводность относительно невелик, поскольку значения энергии, переносимой ионом и нейтральным атомом, сопоставимы, а доля ионов относительно мала. Электроны, скорость которых значительно превышает скорость тяжелых частиц, вносят заметный вклад в теплопроводность плазмы уже при малых степенях ионизации NJNa'Z.YmiM (m —масса электрона; М-масса атома, иона). При этом, поскольку обмен энергией электронов с атомами мал *(~mlM),* вклады в теплопроводность нейтральных частиц и электронов аддитивны. Наряду с этим определенный вклад в теплопроводность равновесного ионизованного газа вносит процесс установления ионизационного равновесия^

Атомы переходят в область с более высокой температурой и там ионизуются, перенося таким образом энергию, равную потенциалу ионизации. Наоборот, заряженные частицы, переходя из более нагретой области в менее нагретую, рекомбинируют там, также перенося такую же энергию в том же направлении. Таким образом, коэффициент теплопроводности слабоионизованной равновесной плазмы и представляется в виде

$$X = \quad + \quad +$$

где Ха, v-e, yitm — вклады в теплопроводность, обусловленные нейтральными частицами, электронами и переносом энергии ионизации соответственно. Вклад последнего слагаемого в теплопроводность максимален при Ne/Na~ ***m/M*** и в этих условиях достигает 30%. Поскольку равновесная степень ионизации газа зависит не только от температуры, но и от давления, теплопроводность ионизованного газа также существенно зависит от этих двух параметров. Погрешность приводимых в табл. 20.8 данных составляет ~107о- В табл. 2.9 представлены данные о теплопроводности плазмы воздуха.

Таблица 20.8. Теплопроводность плазмы инертных газов при атмосферном давлении и различной температуре, 10-^ Вт/(см-К) [81

Газ	Температура, W К								
	2	1 3	4	5	6	7		g	10
He	0,51	(3,66	1,0	1,2	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3
Ne	0,17	(3,22	0,29	0,32	0,35	0,4	0,45	0,54	0,63
Ar	0,055	(3,08	0,1	0,12	0,14	0,17	0,23	0,37	0,84
Kr	0,032	(3,045	0,052	0,07	0,09	0,12	0,19	0,40	0 89
Xe	0,024	(3,030	0,038	0,05	0,06	0,08	0,14	0,40	

Таблица 20.9 Теплопроводность плазмы воздуха при атмосферном давлении и различной температуре 10-гВт/(см-К) [10]

m. 10^ К		*m,* 10» К		*m,* 10= К		*m.* 10» К	
2	0,12	7	3,42	12	2,57	17	2,95
3	0,51	8	1,75	13	3,35	18	2,44
4	0,74	9	1,38	14	3,94	19	2,21
5	0,77	10	1,44	15	4,0		
6	2,07	11	2,0	16	3,46		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков В. Л., Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Химия плазмы/Под ред. Б. М. Смирнова. Вып. 10. М.: Энергоатомиздат. 1983.
2. Gallagher J. a. e.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1983. Vol. 12. P. 109—161.
3. Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат. 1974.
4. Мак-Даниель И., Мэзон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.
5. Linuma K. e. a.//J. Chem. Phys. 1983. Vol. 79. P. 3893—3904.
6. Lamm D. R. e. a.//Ibid. P. 1965—1973.
7. Bohringer H., Durup-Ferguson M , Fahey D. W.// J. Chem. Phys. 1983. Vol. 79. P. 1974—1981.
8. Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизованном газе. М.: Атомиздат. 1975.
9. Палкина Л. А., Смирнов Б. М./Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12. С. 3—10.
10. Ролин Н. М./Инж.-физ. журн. 1978. Т. 34. С. 444—454.
11. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1972,

Глава 21
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В. С. Егоров. И. Н. Хлюстиков

21.1. ВВЕДЕНИЕ

К металлам относятся вещества, в которых при абсолютном нуле имеется одна или несколько не полностью заполненных электронами энергетических зон. Поверхность в конфигурационном (импульсном) пространстве, разграничивающая занятые и пустые состояния, носит название поверхности Ферми (ПФ). Наличием ПФ металлы отличаются от всех прочих веществ, а ее формой— друг от друга.

Сопротивление металлов электрическому току связано с процессами рассеяния электронов проводимости. Выражение для удельного сопротивления р имеет вид

$$\textit{Ne4} \qquad \textit{Ne4} \qquad (21.1)$$

где т, е — масса и заряд электрона; Af — эффективная плотность электронов; *v a,* — скорость электрона на поверхности Ферми; т — среднее время жизни электрона между двумя актами рассеяния; / — соответствующая средняя длина пробега.

Существуют два основных механизма рассеяния: 1) столкновение электронов с локальными неподвижными центрами — примесями, дефектами и пр.; 2) рассеяние тепловыми колебаниями решетки — фононами.

В меру независимости этих процессов эффективная частота соударений равна сумме частот соударений первого и второго процессов, т. е. 1/Тэф = 1/Тприм-)-1/Тфон. Это приводит к правилу Матиссена

$$\textbf{Рполи} = \textbf{Рост} + \textbf{Рид (Т)}, \qquad (21.2)$$

где **рост** — не зависящее от температуры ***Т*** остаточное сопротивление, связанное с технологией данного образца металла и тем меньшее, чем совершеннее образец; ридСП—сопротивление идеальной решетки данного металла, обусловленное рассеянием на фононах и сильно зависящее от температуры, которое описывается форму-

лой Блоха—Грюнайзена:

$$\text{Рид} = \frac{\text{КГ»}\ C}{\text{ме»}}\ Ш \qquad (21.3)$$

где К — постоянная, связанная с удельным объемом металла; М —атомная масса; 6 — характеристическая температура Дебая — параметр металла, характеризующий максимальную частоту колебаний решетки (Гт^а^х^ке). Для высоких температур Г/в^!

$$\text{Рид} = \text{const} \cdot \frac{\text{КГ»}}{\text{ме»}} \cdot \frac{T}{\Theta^2} \qquad (21.4)$$

т. е. сопротивление растет с увеличением температуры линейно; для низких температур Г/6^;!

$$\text{Рид} = \text{const} \cdot \frac{\text{КГ»}}{\text{ме»}} \cdot \frac{T^5}{\Theta^6} \qquad (21.5)$$

Для металлов с ПФ, близкой к сферической, закон рсоГ= начинает выполняться при Г'^0,16. Для металлов со сложной ПФ этот закон начинает выполняться при гораздо более низких температурах, когда значение импульса тепловых фононов становится меньше всех характерных размеров поверхности Ферми. (Так, для висмута Г<0,1 К).

Наличие некоторых примесей может заметно влиять на Рид (Г), это является причиной отклонения от правила Матиссена.

Рассеяние на маги-нтных примесях приводит к логарифмически возрастающей с уменьшением температуры добавке к сопротивлению — эффекту Кондо, что используется в термометрии. Некоторые металлы при низких температурах переходят в сверхпроводящее состояние. Минимально возможная длина пробега (порядка межатомных расстояний) определяет максимальное металлическое удельное сопротивление р^ах ~ ah^Je^— 0,2- Ю"» Ом-см ***(a*** — межатомное расстояние).

В этой главе значительное место уделено металлам и сплавам, находящим разнообразное применение в технике. В связи с этим приведены также характеристики некоторых неэлектрических свойств этих материалов, связанные с их электроте.хническим применением.

21.2. ЧИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ

Значения удельного сопротивления ро, 10-® Ом-см, и температурного коэффициента сопротивления ао= = l/**Po**(dp/d7"), 10"= °С, при 0°С представлены в табл. 1i.1 [IJ. l; четвертом столбце приведены значения характеристической температуры 6, полученные из измерений теплоемкости [2]. Из выражения (21.3) следует, что для любого металла приведенное сопротивление г=рг/рв должно быть универсальной функцией приведенной температуры ***T/6-***.

$$\text{Рид} = 1{,}056 \quad \textbf{\textit{(TmF(e/T),}} \qquad \textbf{(21.6)}$$

Пользуясь табл. 21.1, можно получить значения удельного сопротивления в широком диапазоне температур

$$\text{Рид} = \text{const} \cdot \frac{T}{\Theta} \qquad (21.7)$$

где ро и Го — значения удельного и приведенного сопротивлений при О °С, а значения функции f(в/Г) даны в табл. 21.2 [3]. В табл. 21.3 [4, 5] приведено удел11Ное сопротивление анизотропных монокристаллов вдоль и поперек главной оси. Данные для графита [6—8] соответствуют как монокристаллам природного происхождения графнта-1, так и искусственно выращенным монокристаллам пиролитического графита-2. В табл. 21.4 [9] приведены соотношения между сопротивлением и длиной про-

Таблица 21.1. Удельное сопротивление температурный коэффициент а„ при О'С и характеристическая температура в чистых металлов [1,2]

Металл	I0-" Ом см	ш-Гк-	о, к
i	2,50	460	433
Ьарии	36	649	111
Бериллий	3,2	900	1481
Ванадий	18.2	390	398
Висмут	110,0	454	120
Вольфрам	4,89	510	383
Гадолинии	140	176	182
Галлий	40	369	325
Iафнин	30	440	252
1 ОЛьмии	87	171	190
Диспрозий	56	119	183
Желето	8,6	651	477
Золото	2,06	402	162
Индий	8,19	490	112
Иридий	4,93	411	420
Иттербий	30	130	118
Кадмий	7,07	462	210
Калий	6,1	673	91
Кальций	4,06	417	229
Кобальт	5,57	604	460
Лантан	57,6	213	150
Литий	8,55	489	344
Лютеций	79	240	183
Магний	4,31	412	403
а-Марганец	278	50	409
f-Марганец	91	136	–
7-Марганец	39,2	628	–
Медь	1,55	433	347
Молибден	5,03	473	423
Мышьяк	26	475	282
Натрий	4,28	546	156
Неодим	71	200	163
Никель	6,14	692	477
Ниобий	16,1	343	276
Олово	11,15	465	199
Осмий	9,5	420	467
Палладий	9,77	377	271
Платина	9,81	396	237
Полоний	42	460	
Празеодим	65,8	171	152
Рений	18,9	455	416
Родий	4,35	462	512
Ртуть	94,07	99	72
Рубидий	11,29	637	56
Рутений	7,16	458	555
Самарий	88	148	169
Свинец	19,2	428	105
Серебро	1,49	430	227
Стронций	30,3	383	147
Сурьма	39,0	511	220
Таллий	16,2	517	78
Тантал	12,4	382	245
Титан	42	546	420
Торий	13	275	160
Тулий	79	195	200
Уран	21	282	248
Хром	14,1	301	606
Цезий	18,1	503	40
Церии	72,7	97	179
Цинк	5,65	417	328
Цирконий	41	440	290
Эрбий	107	252	188

Таблица 21.2. Значения функции f(в/Т) при различных 6 /Г [3J

ь/т	*FibIT)*	е/г	*F{blT)*
0	1,0000	6,3	0,1942
0,1	0,9994	6,4	0,1867
0,2	0,9978	6,5	0,1795
0,3	0,9950	6,6	0,1725
0,4	0,9912	6,7	0,1658
0,5	0,9862	6,8	0,1593
0,6	0,9803	6,9	0,1531
0,7	0,9733	7,0	0,1471
0,8	0,9653	7,1	0,1414
0,9	0,9563	7,2	0,1359
1,0	0,9465	7,3	0,1306
ЫЛ	0,9357	7,4	0,1255
1,2	0,9241	7,5	0,1206
1,3	0,9118	7,6	0,11599
	0,8986	7,7	0,11150
1^5	0,8848	7,8	0,10719
1,6	0,8704	7,9	0,10306
1,7	0,8554	8,0	0,09909
1,8	0,8398	8,1	0,09529
1,9	0,8238	8,2	0,09165
2,0	0,8073	8,3	0,08816
2,1	0,7905	8,4	0,08480
2,2	0,7733	8,5	0,08159
2,3	0,7559	8,6	0,07851
2,4	0,7383	8,7	0,07555
2,5	0,7205	8,8	0,07272
2,6	0,7026	8,9	0,07000
2,7	0,6846	9,0	0,06740
2,8	0,6666	9,1	0,06490
2,9	0,6486	9,2	0,06250
3,0	0,6307	9,3	0,06021
3,1	0,6128	9,4	0,05800
3,2	0,5950	9,5	0,05589
3,3	0,5775	9,6	0,05386
3,4	0,5600	9,7	0,05192
3,5	0,5428	9,8	0,05005
3,6	0,5259	9,9	0,04826
3,7	0,5091	10,0	0,04655
3,8	0,4927	10,1	0,04490
3,9	0,4766	10.2	0.04332
4,0	0,4608	10,3	0,04181
4,1	0,4453	10,4	0,04035
4,2	0,4301	10,5	0,03896
4,3	0,4153	10,6	0,03762
4,4	0,4008	10,7	0,03633
4,5	0,3867	10,8	0,03509
4,6	0,3729	10,9	0,03390
4,7	0,3595	11,0	0,03276
4,8	0,3466	11,1	0,03167
4,9	0,3340	11,2	0,03061
5,0	0,3217	11,3	0,02960
5,1	0,3098	11,4	0,02863
5,2	0,2983	11,5	0,02769
5,3	0,2871	11,6	0,02680
5,4	0,2763	11,7	0,02593
5,5	0,2658	11,8	0,02510
5,6	0,2557	11,9	0,02430
5,7	0,2460	12,0	0,02353
5,8	0,2366	12,1	0,02279
5,9	0,2275	12,2	0,02208
6,0	0,2187	12,3	0,02139
6,1	0,2103	12,4	0,02073
6,2	0,2021	12,5	0,02009

e/m	1		F(e/r)
12,6	0,01948	17,6	0,0^5185
12,7	0,01889	17,8	0,0^4956
12,8	0,01832	18,0	0,0^4740
12,9	0,01777	19,0	0,0^3819
13,0	0,01725	20,0	0,023111
13,2	0,01624	22	0,0s.2125
13,4	0,01531	24	0,0^1500
13,6	0,01445	26	0,021089
13,8	0,01364	28	0,O38O97
14,0	0,01289	30	0,0з6145
14,2	0,012185	32	0,0з4747
14,4	0,011528	34	0,0**3**3724
14,6	0,010915	36	0,0з2963
14,8	0,010344	38	0,0я2387
15,0	0,029805	40	0,0,1944
15,2	0,029302	44	0,0з1328
15,4	0,0^8831	48	0,049375
15,6	0,0^8389	50	0,047964
15,8	0,0^7974	52	0,046806
16,0	0,0^7584	56	0,045061
16,2	0,0^7218	60	0,043841
16,4	0,026873	64	0,042967
16,6	0,0^6549	68	0,0^2328
16,8	0,0,6243	70	0,042073
17,0	0,0^5955	72	0,041852
17,2	0,0^5683	76	0,041492
17,4	0,025427	80	0,041215

волок в диапазоне значений диаметра от 0,05 до 4,0 мм и удельного сопротивления материала от 0,016-10-^ до 1,4-10-< Ом-см.

Жидкие металлы. При плавлении сопротивление большинства металлов увеличивается. У металлов, объем которых уменьшается при плавлении (висмут, сурьма, галлий), сопротивление уменьшается (табл. 21.5, 21.6, рис. 21.1, 21.2).

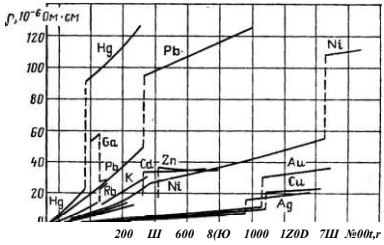


Рис. 21.I. Изменение сопротивления с температурой некоторых металлов в твердом и жидком состояния.х {9]

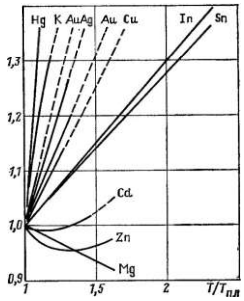


Рис. 21.2. Зависимость относительного удельного сопротивления различных жидких металлов prlpTnn от T/Tши [4] пунктир — экстраполяция)

21.3. ВЛИЯНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Сопротивление металлов, как правило, уменьшается при приложении к ним внешнего гидростатического давления *P.* Зависимость *R{P)* некоторых металлов может быть не монотонной, на ней имеют место изломы и скачки, обусловленные фазовыми превращениями, что используется в физике высоких давлений в качестве реперных точек. В табл. 21.7 дается относительное изменение сопротивления (но не удельного сопротивления, для которого необходимо учитывать изменения размеров) с обратным знаком в диапазоне 0<P<10 ГПа. Все данные соответствуют измерениям при температуре 25—30 L11J.

21.4. сопротивление и длина проволок диаметром от 0.05 ДО 4.0 мм

Сопротивление проволоки длиной 1 м. Ом

0,05	8,15	8,66	9,17	**9,68**	10,19	12,73	13,75	15,3	20,4	25,5	30,6
0,10	2,04	2Л6	2,29	2,42	2,55	**3,18**	3,44	3,8	5,1	6,4	7,6
0,15	0,91	0,96	1,02	1,07	1,13	1,41	1,53	1,70	**2,26**	2,83	3,4
0,20	0,51	0,54	0,57	**0,60**	0,64	**0,80**	0.859	0,95	1,27	1,59	1,91
0,25	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,51	0,550	о,6ı	о,8ı	**1,02**	1,22
0,30	0,226	0,240	0,255			0,354	0,382	0,424	0,566	0,707	
0,40	0,127	0,135	0,143	0Л51	0Л59	0,199	0,215		0,318	0,398	0^477
0,50	0,081	0,087	0,092	0,097	**0, 102**	0,127	0,138	0Л53	0,204	0,255	0,306
0,60	0,057	0,060	0,064	0,067	0,071	**0,088**	0,0955	0,106	0.141	0,177	**0, 212**
0,70	0,042	0,044	0,047	0,049	0,052	0,065	0,0702	0,078	0,104	0,130	0,156
0,80	0,0318	0,0338	0,0358	0,0378	0,0398	0,0497	0,0537	**0,060**	0, 080	0,099	0,119
1,00	0,0204	0,0216	0,0229	0,0242	0,0255	0,0318	0,0344	0.038	0.051	0,064	0,070
1,2	0,0142	0,0150	0,0159	**0, 0168**	0,0177	**0, 0221**	0,0239	0,0265	0,0354	0,0442	0,053
1,4	0,0104	0,0110	0,0117	0,0123	0,0130	**0, 0162**	0,0175	0,0195	0,0260	0,0325	
1,6	0,0080	0,0085	0,0090	0,0095	0,0099	0,0124	0,0134	0,0149	0,0199	0,0249	0^0298
2,0	0,0051	0,0054	0,0057	**0,0060**	0,0064	**0,0080**	0,00859	0,0095	0,0127	0,0159	0,0191
•2,5	0,00326	0,00346	0,00367	0,00387	0,00407	0,0051	0,00550	0,0061	**0, 0081**	**0, 0102**	0, 0122
3,0	0,00226	0,00240	0,00255	0,00269	0,00283	0,0035	0,00382	0,0042	0,0057	0,0071	0,0085
3,5	0,00166	0,00177	0,00187	0,00197	**0,00208**	**0,00260**	0,00281	0,00312	0,00416	0,0052	0, 0062
4,0	0,00127	0,00135	0,00143	0,00151	0,00159	0,00199	0,00215	0,00239	0,00318	0,0040	0,0048

Длина проволоки сопротиелением 1 Ом, м

0,05	0,123	0,115	0,109	0,103	0,098	0,079	0,073	0,065		0,039	0,0327
0,10	0,49	0,46	0,44	0,41	0,39	0,314	0,291	**0,262**	0,196	0,157	0,131
0,15	1,11	1,04	0,98	0,93	**0,88**	0,71	0,655	0,59	0,44	0,35	0,295
0,20	1,96	1,85	1,75	1,65	1,57	**1,26**	1,16	1,05	0,79	0,63	0,52
0,25	3,07	2,89	2,73	2,58	2,45	1,96	**1,82**	1,64	1,23	0,98	**0,82**
0,30	4,4	4,2	3,9	3,7	3,5	2,83	**2,62**	2,36	1,77	1,41	1,18
0,40	7,9	7,4	7,0	**6,6**	6,3	5,03	4,65	4,19	3,14	2,51	2,09
0,50	12,3	11,5	10,9	10,3	9,8	7,85	7,27	6,54	4,91	3,93	3,27
0,60	27,6	16,6	15,7	14,9	14.1	11,3	10.5	9,4	7,1	5,7	4,7
0,70	24,0	22,6	21,4	20.3	19.2	15,4	14,3	**12,8**	9,6	7.7	6,4
0,80	31,4	29,6	27,9	26.4	25,1	**20,1**	18.6	**16,8**	**12,6**	10,1	8,4
1,00	49,1	46,2	43,6	41,3	39.3	31,4	29,1	**26,2**	19,6	15.7	13,1
1,2	71	66	63	59	57	45	41,9	37,7	28,3	**22,6**	**18,8**
1,4	96	90		81	77	62	57,0	51,3	38,5	30.8	25,7
1,6	126	118	112	106	101		74,5	67	50	40	33,5
2,0	196	185	175	165	157	126	116	105	79	63	52,4
2,5	307	289	273	258			182	164	123	98	82
3,0	442	416		372	353		262	236	177	141	118
3,5	601	566		506	481		356	321	241	192	160
4,0	785	739		661			465	419	314	251	209

Таблица 21.3. Удельное сопротивление для анизотропных металлических кристаллов [4-8]

			Омсм				Кристаллическая структура			
Бериллий		Геке.	3,58	3,12	0,88	Кадмий	0		7,73	6,35	0,87
Висмут		Ромб.	127	99	78	Магний	О		3.58	4.22	1,21
Вольфрам		Куб.		0,845	0,945	Мышьяк	О		26	23,8	0,92
						Олово	0	Тетр.	9,09	13,08	1,46
Галлий	20	Ромб.		'A'.'3'	0,31	Ртуть	—45,5	Ромб.	17,8	23.5	1,32
Гафний	О	Геке.	32,7	32.0	0,98		О		26,3	36.0	1,37
Графит 1*	20		5400	41	7.6-10-®	Srr	О	Геке.	5.59	5,39	0,96
	-195		2300	20	8.7-ю-®						
Графит 2*	20		1,7-10=^	44,3	2,6-10-^						
	-195		3-1№	25,9	8,6-10-5						

• Графит 1 и графит 2 - природный и искусственный пиролитический.

С удельным сопротивлением от 0,016 до 1,40-Ю"» Ом-см [9]

диаметр.	0.07	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0.30	0,40	0,50	0,60	0,75	0,85	1,00	1,10	1.20	1,40
0,05	36	41	51	76	102	127	153	204	255	306	382	433	509	560	611	713
0,10	8,9	10,2	12,7	19,1	25,5	31,8	38	51	64	76,4	95,5	108	127	140	153	178
0,15	4,0	4,5	5,7	8,5	11,3	14,1	17,0	22,6	28,3	33,9	42,4	48	56,6	62,2	67,9	79.2
0,20	2,23	2,55	3,18	4,8	6,4	8,0	9,5	12,7	15,9	19,1	23,9	27,1	31,8	35,0	38,2	44.6
0,25	1,43	1,63	2,04	3,06	4,1	5,1	6,1	8,1	10,2	12,2	15,3	17,3	20,4	22,4	24,4	28.5
0,30	0,99	1,13	1,41	2,12	2,83	3,54	4,24	5,66	7,07	8,49	10,6	12,0	14,1	15,6	17,0	
0,40	0,56	0,64	0,80	1,19	1,59	1,99	2,39	3,18	3,98	4,78	5,97	6,76	7,96	8,76	9,55	11.1
0,50	0,36	0,41	0,51	0,76	1,02	1,27	1,53	2,04	2,55	3,06	3,82	4,33	5,09	5,60	6,11	7,13
0,60	0,248	0,283	0,354	0,53	0,71	0,88	1,06	1,41	1,77	2,12	2,65	3,00	3,54	3,89	4,24	4,95
0,70	0,182	0,208	0,260	0,39	0,52	0,65	0,78	1,04	1,30	1,56	1,95	2,21	2,60	2,86	3,12	3,64
0,80	0,139	0,159	0,199	0,298	0,398	0,497	0,60	0,80	0,99	1,19	1,49	1,69	1,99	2,19	2,39	2,79
1,00	0,080	0,102	0,127	0,191	0,255	0,318	0,38	0,51	0,64	0,764	0,955	1,08	1,27	1,40	1,53	1,78
1,2	0,062	0,071	0,088	0,133	0,177	0,221	0,265	0,354	0,442	0,531	0,663	0,75	0,884	0,973	1,06	1,24
1,4	0,045	0,052	0,065	0,097	0,130	0,162	0,195	0,260	0,325	0,390	0,487	0,55	0,650	0,715	0,779	0,909
1,6	0,0348	0,0398	0,0497	0,075	0,099	0,124	0,149	0,199	0,249	0,298	0,373	0,423	0,497	0,547	0,597	0,696
2,0	0,0223	0,0255	0,0318	0,048	0,064	0,080	0,095	0,127	0,159	0,191	0,239	0,271	0,318	0,350	0,382	0,446
2,5	0,0143	0,0163	0,0204	0,0305	0,0407	0,051	0,061	0,081	0,102	0,122	0,153	0,173	0,204	0,224	0,244	0,285
3,0	0,0099	0,0113	0,0141	0,0212	0,0283	0,035	0,042	0,057	0,071	0,085	0,106	0,120	0,141	0,156	0,170	0,198
3,5	0,0073	0,0083	0,0104	0,0156	0,0208	0,0260	0,0312	0,0416	0,052	0,062	0,078	0,088	0,104	0,114	0,125	0,146
4,0	0,0056	0,0064	0,0080	0,0119	0,0159	0,0199	0,0239	0,0318	0,040	0,048	0,060	0,068	0,080	0,087	0,095	0,111
0,05	0,0280	0,0245	0,0196	0,0131	0,0098	0,0079	0,0065	0,0049	0,0039	0,0033	0,0026	0,0023	0,0020	0,0018	0,0016	0,0014
0,10	0,112	0,098	0,079	0,052	0,039	0,0314	0,0262	0,0196	0,0157	0,0131	0,0105	0,0092	0,0078	0,0071	0,0065	0,0056
0,15	0,252	0,221	0,177	0,118	0,088	0,071	0,059	0,044	0,035	0,0295	0,00236	0,0208	0,0177	0,0161	0,0147	0,0126
0,20	0,45	0,39	0,314	0,209	0,157	0,126	0,105	0,079	0,063	0,0524	0,0419	0,0370	0,0314	0,0286	0,0262	0,0224
0,25	0,70	0,61	0,49	0,327	0,245	0,196	0,164	0,123	0,098	0,0818	0,0655	0,0578	0,0491	0,0446	0,0409	0,0351
0,30	1,01	0,88	0,71	0,47	0,35	0,283	0,236	0,177	0,141	0,118	0,0943	0,083	0,0707	0,0643	0,0589	0,0505
0,40	1,80	1,57	1,26	0,84	0,63	0,503	0,419	0,314	0,251	0,209	0,168	0,148	0,126	0,114	0,105	0,0898
0,50	2,80	2,45	1,96	1,31	0,98	0,785	0,654	0,491	0,393	0,327	0,262	0,231	0,196	0,179	0,164	0,140
0,60	4,0	3,53	2,83	1,88	1,41	1,13	0,94	0,71	0,57	0,471	0,377	0,332	0,283	0,257	0,236	0,202
0,70	5,5	4,81	3,85	2,57	1,92	1,54	1,28	0,96	0,77	0,641	0,513	0,453	0,385	0,350	0,321	0,275
0,80	7,2	6,3	5,0	3,25	2,51	2,01	1,68	1,26	1,01	0,838	0,670	0,592	0,503	0,457	0,419	0,359
1,00	11,2	9,8	7,9	5,24	3,93	3,14	2,62	1,96	1,57	1,31	1,05	0,924	0,785	0,714	0,655	0,561
1,20	16,2	14,1	11,3	7,5	5,7	4,5	3,77	2,83	2,26	1,89	1,51	1,33	1,13	1,03	0,943	0,808
1,40	22,0	19,2	15,4	10,3	7,7	6,2	5,13	3,85	3,08	2,57	2,05	1,81	1,54	1,40	1,28	1,10
1,60	28,7	25,1	20,1	13,4	10,1	8,0	6,7	5,0	4,0	3,35	2,68	2,37	2,01	1,83	1,68	1,44
2,0	44,9	39,2	31,4	20,9	15,7	12,6	10,5	7,9	6,3	5,24	4,19	3,7	3,14	2,86	2,62	2,24
2,5	70	61	49	32,7	24,5	19,6	16,4	12,3	9,8	8,18	6,55	5,8	4,91	4,46	4,09	3,51
3,0	101	88	71	47,1	35,3	28,3	21,6	17,7	14,1	11,8	9,43	8,3	7,07	6,43	5,89	5,05
3,5	137	120	96	64	48	38,5	32,1	24,1	19,2	16,0	12,8	11,3	9,62	8,75	8,02	6,87
4,0	180	175	126	84	63	50,3	41,9	31,4	25,1	20,9	16,8	14,8	12,6	11,4	10,5	8,98

Таблица 21.5. Изменение сопротивления и некоторых металлов при плавлении [1]

Металл	'пл-	Рж' ю-» Ом • см	Рш-Ртв	AV/V^	Металл	'пл- "С	10-» Ом см	Рж/Ртв	
Алюминий	660	20,1	1,64	+0,048	Магний	651	27,9	1,63	+0,041
Висмут	271	123	0,43	-0,033	Медь	1083	21,5	2,07	+0,042
Галлий	29,9	25,9	0,58	-0,03	Натрий	97,6	–	1,45	+0,027
Железо	1535	139	1,09	+0,03	Олово	327,4	99,3	2,07	+0,035
Золото	1063	30,8	2,28	+0,051	Ртуть	—38,9	90		+0,037
Индий	156	–	2,12	–	Рубидий	38,7			+0,028
Кадмий	321	–	1,89	+0,05	Серебро	961	1 М	1,9	-1-0,038
Калий	62,5	–	1,56	+0,026	Сурьма	630	108	0,71	-0,09
Литий	180	–	1,68	+0,017	Таллий	302		2,0	+0,03
					Цинк	420	32,6	2,11	+0,042
					Цезий	29,7		1,66	4-0,026

Таблица 21.6. Удельное сопротивление некоторых жидких металлов р, 10-® Ом • см

'С	К	K5.Na„		Си	Ni	Sn	Sb	Zn	Cd	Al	Fe	Pb
100	15,49	41,61	45,63									
200	21,8	47,23	51,33									
300	28,2	54,33	58,58	—	—	49,4	—	—	—	—	—	–
400	—	62,21	65,65	—	—	51,6	—	—	33,7	—	—	98
500	–	69,37	73,48	—	—	53,9	—	34,55	34,1	–	—	103
600	–	78,29	82,61	—	—	56,0	—	35,5s	34,8	–	—	107
700	–	88,23	91,76	—	—	58,3	129	35,65	35,8	27.8	—	112
800	—	99,68	104,51	–	—	60,5	131	35,7o	—	29,3	—	116
900	—		—	–	—	62,7	133	35,75	—	30,8	—	121
1000	—		—	–	—	65,0	135	—	—	32,2	—	126
1100	–	—	—	21,5	–	67,2	138	–	—	33,7	–	–
1200	–	—		22,4	—	69,5	140	—	—	35,2	–	–
1300	—	—	—	23,3	—	71,7	—	—	—	—	–	–
1400	—	—	—	24,2	—	74,0	—	—	—	–	—	–
1500	—	—	—	25,0	109	76,2	—	–	—	–	–	–
1550		—	—	—	ПО	—	–	–	—	–	133	–
1600			—	–	1105	—	–		–	–	136	–
1650	—	–	—	–	***пи***		—	—		—	138	

Таблица 21 7. Относительное изменение сопротивления чистых металлов —= — —RQ) fR^ при всестороннем сжатии, % [1]

Металл	Давление, 10" Па										
	5	ш	»	30	40	50	60	70	80	90	100
Алюмиииий	2,15	4,06	7,66	10,8	13,5		17,6		20,6		23,0
Барий*'	-24,5	-55.6	-137,7	-246,6	—358	—296	—137	—89	-81,5	-во, 5	—81
Бериллий	0,85	1,6	3,1	4,6	5,9	7,1	8,3	9,4	10,4	11,6	12>4
Ванадий	–	1,6	3,1	4,6	5,9	7,1	8,4	9,4	10,5	11,5	12,2
Висмут*^	-6,5	-15,2	-38,3	39,6	43,3	**45,4**	47,2	48,3	**50,2**	51,5	52,6
Вольфрам	0,66	1,305	2,554	3,744	4,9	**6,0**	7,0	8,0	**8,9**	9.7	Ю^6'
Гадолиний	–	4,6	8,8	19,9	23,6	26,8	29,4	31,6	33.3	34,8	35,9'
Галлий*'	2,65	5,31									
Гафний	–	0,87	1,63	2,27	2,79	3,16	3.48	3,Й	3,93	4,08	4,19
Гольмий	–	2,2	4,4	6,6	9,0	11,6	13,8	15,7	17,3	18,4	19,2
Диспрозий	–	2,3	4,7	7,0	9,1	10,6	12,0	13,2	15,2	17,1	16,3
Железо	1,2	2,3	4,4	6,4	8,1	19,7	11,2	12,5	13,8	14,9	15,9
Золото	1,5	2,9	5,6	8,1	**10,4**	12,6	14,5	16,0	17,1	17,9	18,4
Индий	1,7	12,2	21,4	28,3	**34,1**	39,0	43,5	47.1	50.4	53,5	56,2
Иридий	0,69	1,368	2,694	3,978	5,2	6,4	7,6	8,6	9,6	10,5	11,4
Иттербий	–	-97	—288	—624	-101,3	-11,85	–	21,14	23,04	24.12	24,67
Кадмий	3,95	7,32	12,8	17,16	20,8	23,8	26,4	28,7	30,7	32.5	34,2
Калий	50,9	69,7	81,8	82,2	79,7	74,8	69,1	63,0	56,1	48,6	40.4
Кальций	—7,2	—15,2	—33,4	-56,7	-81,1	— 106,9	—134	—161,8	— 191,6	—224,4	—265,(
Кобальт	0,465	0,904	1,704	2,397	3,0	3,5	3,9	4,2	4,5	4,7	4,9
Лантан**	0,9	1,7	3,5	10,6							
Литий	-3.5	—7,2	-5,2	—23,9	—30,5	—36,6	—42,8		—55,1	-12,3	***-To„I***
Лютеций	–	1,31	2,86	4,75	6,40	7,81	9,03	10,09	10,98	11,75	12,39
Магний	2,29	4,7	8,4	11,4	14,1	16,3	18,3	20,0	21,4	22,4	23,3
Марганец	1,92	3,54	6,08	7,89	9,1	10,0	10,8	11,7	12,8	14,4	15,9
Медь	0,9	1,8	3,5	5,1	6,6	8,0	9,3	10,5	11,6	12,5	13,4
Молибден	0,65	1,289	2,532	3,729	4,9	6,0	7,1	8.1	9.1	10,0	10,8
Мышьяк, ХС	–	6,7	11,8	15,6	18,6	21,1	23,3	25,0	26,6	28,2	30,2
Натрий	24,6	38,2	51.8	58,2	60,8	61,0	60,1	58.8	57,0	54,8	52,1
Неодим	0,9	1,5	3,1	4,0	4,5	4,7	4,7	4,7	4,6	4,3	3,8
Никель*б	0,9	1,824	3,552	5,184	6,7	8,2	9,6	10,8	12,0	13,1	14,2
Ниобий	0,69	1,366	2.662	3,888	5.0	6,2	7.2	8,2	9,1	9,9	10,6
Олово	4,9	9,2	16,5	22,5	27,6	31.7	35,3	38.2	40.8	43,1	45,2
Осмий											
Палладий	1,05	2,10	4,2	6,3	7,5	9,1	10,6	11,9	13,1	14,2	15,3
Платина	0,95	1,879	3,664	5,340	6,9	8.4	9,7	10.9	12.0	13,0	13,9
Полоний											
Празеодим	0.3	0.4	0,4	0,2	-0,1	0,6	6,9	11.1	12,0	11,8	11,0
Рений (Д/?//?2о)	–	14	0	–	14,4	—	21,3	—	25,8		29,4
Родий	0,819	1,622	3,182	4,680	6,1	7,5	8,8	10,0	11,1	12,0	12,8
Ртуть*»	11,4	20,8	85,0	95,6	112,6	114,6	116,7	118,5	120,1	121,6	122,8
Рубидий	52,9	62,9	62.4	48,4	30.5	7,6	—21,8	-59.4	—97,2	-138	-195
Рутений	1,24	2,48	–	–	–	–	–	–	—	—	—
Самарий	–	3,6	6,1	8,2	9,5	10,5	11,2	11,8	12,3	12,6	12,8
Свинец	6,8	12,5	21,8	29,2	34,9	39,4	42,7	45,4	47,6	49,5	51,0
Серебро	1,7	3,4	6,4	9,0	11,5	13,6	15,4	16,9	18,1	19,1	19,8
Стронций*'	-24,5	-55,6	— 137,7	-246,6	-358	-29	—137	-89	-81.5	-80,5	-81
Сурьма	–	-6,0	-10,4	-10,3	—7,8	—2,1	6,2	16,3	24,4	32,6	39,5
Сурьма, ==хС(87°)	-2,6	—4,5	—4,2	—4,7	-	-	-	-	-	-	–

Металл	Давление, 10» Па										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Сурьма (4Г от С)	-5,5	-12,6	-25,6	—31,5	—	—	—	—	—	—	—
Таллий*8	6,38	11,80	20,5	27,3	33,5	56,4	60,9	64,8	68,1	71,0	**73,5**
Тантал	0,811	1,621	3,196	4,650	5,9	7,1	8,2	9,2	10,2	11,0	**11,8**
Титан	0,575	1,118	2,126	3,051	3,9	4,7	5,5	6,2	6,9	7,6	8,4
Торий		3,4	6,3	8,8	10,8	12,4	13,8	15,0	16,0	16,9	17,9
Тулий		2,6	4,7	6,4	7,7	8.7	9,6	10,3	11,2	12,1	13,1
Уран	2,355	4,56	8,634	12,31	16,3	18,8	21.0	23,0	24,8	26,3	27,6
Хром*в	12,45	17,33	22,56	26,88	29,9	32,7	35,3	37,6	39,9	42,0	44.2
Цезий*!"	18,8	—0,5	—91,7	—320	-496	—790	—832	—655	-555	—488	-433
Церий*"	-2,0	45,2	49,4	51,3	52,3	53.1	53.8	53,7	52,9	51,4	51,8
Цинк	—	6,3	11,3	15,3	18,8	21,7	24,4	26,7	28,7	30,5	32,1
Цинк (87°С)	25	4,8	8,5	11,4	–	–	–	–	–	–	–
Цирконий*12	0,195	0 39	0.78		0,8	1,0	1,2	1,4	1,6		
Эрбий		**2,7**	5,0	6,8	8,2	11,0	13.7	15,6	16,8	17,4	17,6

« При 8-10» Па скачок от 103.2 до Н8.5%.
При 24,7-10'Па скачок от +51,4 до-76,1%, при 2,6-10' Па о -6.4 до -38,3%.
Для твердого галлия (О °С) при 10» Па ^Н/R$_{ш}$ = -2,47%.
•в Увеличение давления. В обратном ходе гистерезис, при 2-10», 10» и 5.10» Па Д[?/?$_{ш}$ = -8,4; -4,4; -1,7%.
При 10» Па излом.
При 13,59 • 10» Па переход из жидкого скачок от —26,2 до 75,3%, при 4 • 10» Па ДО -112%.
"При 4,6.10' Па максимум +405%.
При 4,5-10> Па скачок от —30,1 до —.
*» При 3,4 • 10» Па излом, =9,76%.
'» При 2.207 • 10' Па скачок от 120,3 до 143,9%, при 5.495> ХЮ» Па максимум +102%.
' При 7 • 10» Па скачок от +2,7 до —41,8%.
^ Выше 8 • 10' Па падение сопротивления на 16—17%.

Продолжение табл. 21.8

Сплав	Массовое содержание компонентов, %	о	*1 О &*	К 1
Медь-марганец-алюминий	93CU, 5Мп, 2А1	400	22	5
	88CU, ЮМп, 2А1	400	38	- 3
Никелин	б7Си, 30Ni, 2-3Мп	300	40	11
Никелин-нейзильбер	58CU, 22Ni, 20Zn	300	36	31
	54Cu, 26Ni, 20Zn	300	43	23
Нейзильбер	еОСи, 17Ni, 23Zn	300	30	35

21.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Ниже в таблицах и рисунках приводятся данные по сопротивлению металлов, металлов с примесями и сплавов, нашедших практическое применение в электротехнике, приборостроении и других отраслях промышленности.

Таблица 21.8. Удельное сопротивление р температурный коэффициент а при 20 °С сплавов, употребляемых до температуры [1]

Сl?лав	Массовое содержание компонентов, %	¥ - J	δ Ô &	*и* т 1
Константан	54CU, 45Ni, 1Mn	400	50	—3
Манганин	86Cu, 12Mn, 2Ni	300	43	1-2
	85CU, 15Mn	300	51	0,8
	84Cu, 13.МП, ЗА!	400	50	-0,2+-2
	85CU, 9,5Mn, 5.5A1	400	45	1—3
Медь-алюминий	95CU, 5A1	350	11	80
Медь-марганец	91 Cu, 9Mn	350	33,4	—0,8
I	90,5Cu, 9,5Mn	350	35.2	9,1

Таблица 21.9. Удельное сопротивление при 20 и 1000 °С сплавов, употребляемых до температуры [1]

Сплав	Массовое содержание компонентов	t_{max}, °С	ρ_{20}, 10^{-6} Ом · см	ρ_{1000}, 10^{-6} Ом · см
Нихром	70—80Ni, 20Cr, О—2Мп	1150	106	112
	70Ni, 8Fe, 20Cr, 2Мп	1150	110	120
	62Ni, 23Fe, 15Cr	1100	110	119
	63Ni, 20Fe, 15Cr, 2Мп	1150	112	125
	20Ni, 55Fe, 25Cr	1000	97	130
Хромоалюминиевый	65Fe, ЗОСr, 5A1	1350	140	142
	72Fe, 20Cr, 5A1, 3Co	1300	145	151
	86Fe, 12Cr, 2A1	1000	110	122

Г Р

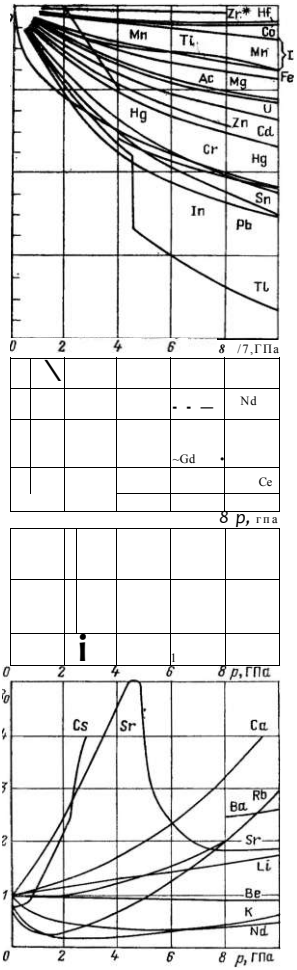


Рис. 21-3. Влияние давления на относительное сопротивление металлов [4]

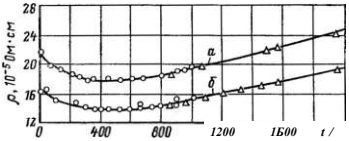


Рис. 21.4. Зависимость удельного сопротивления электродного графита от температуры [10] Нопер ек (а) и вдоль (б) направления прессования

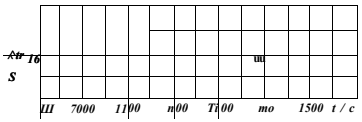


Рис. 21.5. Зависимость удельного сопротивления угольного материала из нефтяного кокса выше температуры отжига от температуры [10]

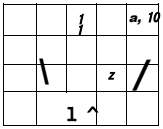


Рис. 21.6. Зависимость относительного сопротивления (/) и температурного коэффициента (2) манганина от температуры [11]

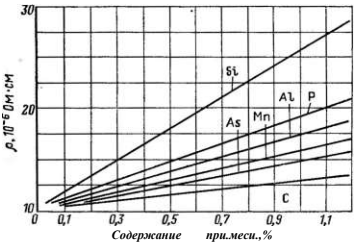


Рис. 21.7. Зависимость удельного сопротивления стали от содержания примесей [11]

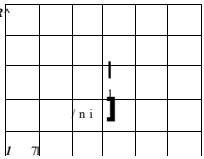


Рис. 21.8. Зависимость относительного сопротивления никеля и палладия от температуры. Сопротивление нормировано на точку Кюри для никеля (631 К) [4]

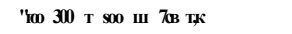


Рис. 21.9. Зависимость температурного коэффициента сопротивления никеля от температуры [4]

Таблица 21.10. Удельное сопротивление р и температурный коэффициент а При 20 °С некоторых сплавов [1]

	Массовое содержание компоиеитов, %	10-^Ъм.см	К"»
	2.Mn, 2A1, ISi, Ni. остальное Co	305	—
Розе	48Bi, 28Pb, 24Sn	67	190
Вуда	56Bi, 14Pb, 14Sn, 16Cd	54	230
	64Fe, 36Ni	75	
	90Fe, lO.Al	100	327
	88Fe, 12Mn	55	^=^200
	96Fe, 4Si	50	
Копель	44Ni+Co, 0,1-1Mn, остальное Cu	465	
Монель	67Ni, 28Cu, остальное Fe + Mn	48	^120
Пермаллой С	70—75Ni, остальное Fe+ + Cu+Cr	55	
Платиноири-диевый	90Pt, lOIr	23,6	123
	85Pt, 15Ir	27,4	100
	80Pt, 20Ir	30	80
Платинородиевый	90Pt. lORh	21,7	139
Платиносеребряный	33Pt, 67Ag	27	24

Рис. 21.10. Влияние примесей на удельное сопротивление серебра [11]

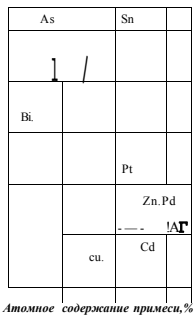
Таблица 21.11. Проводимость проводниковых бронз при 20 °С [11, 12]

Сплав	Состояние	Проводимость, % по отношению к меди
Бронза*:		
кадмиевая (0,9% Cd)	Отожженная	95
	Твердотянутая	83-90
оловянистая (0,8% Cd, 0,6% Sn)	Отожженная	55-60
	Твердотянутая	50-55
алюминиевая (2,5% Al, 2%Sn)	Отожженная	15-18
	Твердотянутая	15-18
бериллиевая (2,25% Be)	Отожженная	17
	Состаренная при 350 'С	30
фосфористая (7% Sn, 0,1% P)	Отожженная	10-15
	Твердотянутая	10-15
Медь хромистая (0.5% Cr)	Состаренная	80-85

• Остальное у всех брои з — медь.

Таблица 21.12. Электрические свойства латуней различных марок при 20 [11]

Сплав	Марка, состав, % (остальное -медь)	10-«0ы-см	
Томпак	Л-96, Zn4	4,3	2,7
Латунь	Л-62, Zn38	7,1	1,7
Латунь железисто-марганцовистая	ЛЖМц 59-1,1 Fe 11, Mn0,8	8,9	1,8
Латунь марганцовистая	ЛМц 58-2 Mn2, Zn40	21,2	1,3
Латунь свинцовистая	ЛС59-1 РЫ, Zn40	6,5	1,7



Атомное содержание примеси,%

Таблица 21.13. Удельное сопротивление чугуна и составляющих его компонентов при 20 °С [13]

сорт (компонент) чугуна	Чугун			Компонент чугуна			
	Серый	Ковкий	Белый	Феррит	Перлит		Ти;
Ю-® Ом • см	80÷ d=40	50±20	70±20	10.4	20	140	150—300

Таблица 21.14. Удельное сопротивление нержавеющих сталей при 20 X [14]

Марка		X	1Й		S 5 X	1	Я
10-6 Ом • см	5.7	6.5	7.5	8,0	10,2	9,5	7.5

Таблица 21.15. Электрические свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной молибденовой нити* (11]
Обозначения: R — сопротивление; W — мощность накала; и — напряжение; / — ток

Т. К	R, 10"» Ом	W, Вт		/. А
273	6,85	–	–	–
300	7,36	–	–	–
400	10,36	–	–	–
1000	30,4	1,73	7,24	248,5
1200	36,9	4,5	12,9	349,0
1400	44,6	10,0	21,1	473,0
1600	52,4	19,8	32,2	614,0
1800	59,8	35,5	46,1	772,0
2000		60,3	64,8	816,0
2200	7bA	96,5	85,2	1130,0
2400	83,3	147,8	111,0	1330,0
2600	91,8	218,5	141,4	1547,0
2800	99,8	304,0	174,0	1745,0
2895	103,4	364,4	194,0	1875,0

» Нить **бесконечна** в смысле отсутствия продольного теплоотвода. **При пересчете к диаметру** *d* **(см)** *R* **делится на** *W* **умножается** *на d. U* **делится на VJ. / умножается на** *Vd^* .

Таблица 21.16. Электрические свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной танталовой нити* [1Ij.
Обозначения: Г — истинная температура; R—сопротивление; W —мощность накала; / —тс /э — ток эмиссии

т. к	R, 10-« Ом	W, Вт	и, в	I. А	/д, А/СМ
300	17,65				
1000	56,2	2^95	0,0118	211	
1100	60,2	3,87	0,0152	254	
1200	64,8	5,78	0,0193	299	
1300	69,7	8,58	0,0244	352	
1400	74,0	12.42	0,0304	408	
1500	79,3	17,2	0,0368	469	
1600	BSJ	23,3	0,0438	528	4,4-10-5
1700	88,1	31,7	0.0527	602	3,14-10-'
1800	92,2	41,7	0,0617	676	1,57-10-'
1900	96,4	53,8	0,0716	751	6,28-10-3
2000	100,3	68,0	0,0821		2,8-10-^
2100	104,3	85,2	0,0936	910	8,8-10-2
2200	108,3	107,5	0,1072	1002	2,7-10-1
2300	112,4	132,9	0,1212	1095	7,85-10-1
2400	116,2	161,3	0,1357	1189	2,04
2500	120,1	196,2	0,1522	1288	4,4
2600	124,0	236,8	0,1699	1394	
2700	127,6	282,8	0,1880	1502	
2800	131,0	332,0	0,2064	1606	–
2900	134,5	387,0	0,2257	1715	–
3000	138,5	454,0	0,2479	1830	–
3100	142.0	526,0	0,2700	1948	–
3200	145,0	611,0	0,2940	2075	
3269	147,0	674,0	0,3110	2164	

' См. сноску к табл. 21.15.

Таблица 21.17. Свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной вольфрамовой нити*1 [5,11
Обозначения: $T_{пл}$ — плавления; $T_{кр}$ — критическая температура, обозначения см. в табл. 21.16

Г, К	Г^.К	R, !0-»'0м	и. 10-'в	W. Вт	I. А	/д. А/СМ»^
273		6,37				
293	–	6,99	–	–	–	
300	–	7,20	–	–	–	
400		10,26	0,0062	0,253	24,67	
500		13,45	0,0305	0,64	47.62	
600		16,85	0,0954	1,268	75,25	
700		20,49	0,240	2,218	108,2	
800		24,19	0,530	3,581	148,0	
900		27,94	1.041	5,393	193,1	
1000	966	31.74	1,891	7,749	244,1	3,36-10-15
1100	1058	35,58	3,223	10,71	301,0	4,77-10-13
1200	1149	39,46	5,210	14,34	363,4	3,06-10-11
1300	1240	43,40	8,060	18,70	430,9	1,01-10-»
1400	1330	47,37	12,01	23,85	503,5	2,08-10-8
1500	1420	51,40	17,33	29,85	580,6	2,87-10-'
1600	1509	55,46	24,32	36,73	662,2	2,91-10-8
1700	1597	59,58	33,28	44,52	747,3	2,22-10-=
1800	1684	63,74	44,54	53,28	836.0	1,4-10-"
1900	1771	67,94	58,45	63,02	927,4	7,15-10-^
2000	1857	72,19	75,37	73,75	1022	3,15-10-3

Продолжение табл. 21.17

т. к	К	кД'Од	*W,* Вт ¦ 1о-« в		/, А	/э-А/см
2100	1943	76,49	95,69	85,57	1119	7,23- 10^=
2200	2026	80,83	119,8	98,40	1217	4,17-10-"
2300	2109	85,22	148,2	112,4	1310	1,28-10-1
2400	2192	89,65	181,2	127,5	1422	0,364
2500	2274	94,13	219,3	143,6	1526	0,935
2600	2356	98,66	263,0	161,1	1632	2,25
2700	2437	103,22	312,7	179,7	1741	5,12
2800	2516	107,85	368,9	199,5	1849	11,11
2900	2595	112,51	432,4	220,6	1961	22,95
3000	2673	117,24	503,5	243,0	2072	44,4
3100	2750	121,95	583,0	266,7	2187	83,0
3200	2827	126,76	671,5	291,7	2301	150,2
3300	2903	131,60	769,7	318,3	2418	265,2
3400	2978	136,49	878,3	346,2	2537	446,0
3500	3053	141,42	998,0	375.7	2657	732,0
3600	–	146,40	ИЗО	406,7	2777	1173
3655	3165	149,15	1202	423,4	2838	1505

^ См. сноску к табл. 21.15.

= /д нормировано на единицу длины инта диаметром 1 СМ\ а единицу площади.

Таблица 21.18. Удельное сопротивление температурный коэффициент сопротивления а&,•= р-1 . йр/йГ рения [15]

С	10-«0м.см	1.0"» К-»	t ° с		
-253	0,015	—	900	72,5	3,13
-200	2,3		1100	80,5	2,94
-100	10		1300	87,0	2,78
0	17,5	–	1500	93,0	2,58
20	19,3		1700	98,5	2,44
100	25,4	3,95	1900	103,0	2,31
300	40,0	3,83	2100	106,5	2,17
500	52,0	3,58	2300	109,0	2,04
700	63,0	3,33			

Таблица 21.19. Зависимость удельного сопротивления сплавов вольфрама и рения от температуры [15]

4.75% Re		21% Re		27% Re	
Т. К	10-® Ом-см	*Т.* К	р, 10-"0м-см	*Т.* К	р. i(r« Ом ом
300	10,4	30	24,2	1400	67,3
630	20,4	550	34,0	1600	73,9
850	27,3	810	42,0	1800	79,9
1020	32,4	980	47,0	2000	85,7
1160	36,7	1120	51,6	2400	91,1
1270	40,0	1250	54,6	2600	96,8
1370	43,2	1360	57,4	2800	102,8
1465	45,9	1460	59,8	3000	109,2
1540	48,5	1540	62,6		
		1610	64,4		

21.5. СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сверхпроводимость — квантовое явление, возникающее вследствие Бозе-конденсации пар электронов проводимости. Двумя важнейшими макроскопическими признаками возникновения сверхпроводящего состояния являются: 1) отсутствие сопротивления протекающему постоянному электрическому току при температуре ниже некоторой критической Тс, 2) выталкивание магнитного Поля из объема сверхпроводника (эффект Мейснера). Существуют критическое магнитное поле Не и критическая плотность тока ***jc,*** при превышении которых сверхпроводимость исчезает. Зависимость критической напряженности магнитного поля от температуры с хорошей точностью описывается формулой

Где ***Т*** — абсолютная температура; Нсв—критическая напряженность магнитного поля при нулевой температуре.

Электроны проводимости металла объединяются в пары благодаря электрон-фононнсму взаимодействию, вследствие чего сверхпроводимость оказывается чувствительной к свойствам кристаллической решетки. Разные кристаллические модификации одного и того же вещества имеют различную критическую температуру. Тс зависит от внешнего давления ***Р.***

К микроскопическим характеристикам сверхпроводника относятся характерный размер пары электронов 1о и глубина проникновения магнитного поля ***X.***

Большинство сверхпроводящих сплавов относится к так называемым сверхпроводникам II рода, в которых возможно сосуществование сверхпроводимости и магнитного поля (фаза Шубникова). Магнитное поле вызывает появление в объеме таких сверхпроводников тонких нитей нормального металла (вихрей Абрикосова) с характерным размером каждая из которых несет квант магнитного потока Фо=^ с/2в, где ft—постоянная Планка, с —скорость света, ***е*** — заряд электрона В связи с тем, что в сверхпроводниках II рода нет полного эффекта Мейснера, в них сверхпроводимость существует при гораздо более высоких значениях напряженности магнитных полей Нс2.

Различные характеристики сверхпроводников представлены в табл. 21.20—21.25 и на рис. 21.11.

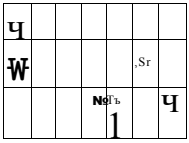


Рис. 21.11. Зависимость критической плотности тока от. индукции магнитного поля при 4,2 К [22]

Таблица 21.20. Сверхпроводимость элементов (массивные образцы при атмосферном давлении)

Элемент		Кристал-структу-	116]	и эПб,	am /dp. 10-" К/Па [17]
Al	Алюминий	гцк	1,1796*2	104,9	-25,5
Be	Бериллий	Гекс.	0,0237*2	—	
Cd	Кадмий	Гекс.	0,519*2	29,6	-18,2
Ga	Галлий	Ромб.	1,091	58,9	-18
H!	**Гафний**	Гекс.	0,015?	–	–
Hg	Ртуть *a* Р 7	Ромб.	4,153 3,95 3,74	390 340 –	-36,6 –
In	Индий	**Тетр.**	3,4145*2	289	-39,1
Ir	Иридий	**ГЦК**	0,100*2	20,1	-0,5
La	Лантан	Гекс.	6!o	1096	190 113
Lu	Лютеций	Гекс.	0,1	–	–
Mg	Магний	Гекс.	0,0005	–	–
Mo	Молибден	ОЦК	0,92	98	— 1
Nb	Ниобий	ОЦК	9,3*2	1980	0
Os	Осмий	Гекс.	0,66	65	-1,8
Pa	Протактиний	ОЦК	1,4	–	–
Pb	Свинец	ГЦК	7,1999*2	803,4	-38,6
Re	Рений	Гекс.	1 698	198	-2
Rh	Родий	ГЦК	0'002?	–	–
Ru	Рутений	Гекс.	0,493	47	0
Sn	Олово	**Тетр.**	3,722	308	-46,3
Ta	Тантал	**ОЦК**	4,46	831	-2,6
Th	**Торий**	ГЦК	1,374	162	— 17
Ti	**Титан**	Гекс.	0,42 5?	56	5,5
Tl	Таллий	Гекс.	2,38	179,5	-23
Tc	Технеций	Гекс.	7,8*2	1410	—12,5
и	Ураи *1*	Ромб.	1,8	–	–
V	Ванадий	ОЦК	5,46	1167	11
w	Вольфрам	ОЦК	0,015*2	1,07	
Zn	Цинк	Гекс.	0,851*2	52	-25
Zr	Цирконий *a* Р И	Гекс.	0,53 1,5 0,72	47,7 – —	14 – –

ГЦК — гранецентрированная кубическая; ОЦК — объемоцентрированная кубическая; тетр. — тетрагональная; гекс. — гексагональная; ромб. — ромбическая.

Значения критической температуры, рекомендованные в качестве реперных точек [19—21].

Таблица 21.21. Сверхпроводимость элементов под давлением [16]

Элемент		Tc^''. К	p, Ю^ Па	йТ /йР, 10-" К/Па
As И	•Мышьяк	0,25	100	
As III		0,5	140	
Ba И	**Барий**	3,2	83	1000
Ba III		3,0	88	-150
Ba IV		5,3	200*1	13
Bi II	**Висмут**	3,916	25	
Bi II		8,2	25	-32
Bi III		7,25	27	-40
Bi IV		7,0	43	-46
Bi V		6,7	68	-30

Продолжение табл. 21.21

Элемент		К	mna	dTJdP, 10-" К/Па
Bi VI		8,55	80	—23
Ce	Церий	1,7	50	
Cs V	Цезий	1,6	125	
Ga II	Галлий	6,24	20	-30
Ge	Германий	5,35	115	–
Hf	Гафний	0,24	160*1	–
a-La	Лантан	8,2 12	23 250*1	140
t t '	Лютеций	0,7	150*1	
P	Фосфор	5,8	170	
Pb 11	Свинец	3,6	160	—2,2
Sb	Сурьма	3,55	85	–
Se	Селен	6,9	130*1	–
Si	Кремний	7,1	120	–
Sn II	Олово	5,3	113	-49,5
Te 11	Теллур	4,2	70	80
Te 1II		4,3	70	-10
Te IV		4,3	80	-42
Tl II	Таллий	2,395	2	-10
Tl III		1,45	35	-49,5
Tl IV		2,32	40	-20
a-U	Уран	2,1	10	–
r	Иттрий	1,15 2,7	9,5 170	**Z**
a-Zr	Цирконий	0,69	**45**	3,5

•» Максимальное , достигнутое в эксперименте.

Таблица 21.22. Сверхпроводимость в пленках [16]

Элемент		j,max. ^	Элемент		j,max. ^
A1	Алюминий	5,8	Nb	Ниобий	10,0
Be	Бериллий	9,6	Re	Рений	7
Bi	Висмут	8	Sn	Олово	6,0
Cd	Кадмий	0,9	Ta	Тантал	4,51
Cr	Хром	1,52	a-Ti	Титан	1,3
Ga	Галлий	8,5	Tl	Таллий	3,15
a-Hf	Гафний	1,3	V	Ванадий	6,02
In	Индий	7	w	Вольфрам	4,55
	Лантан	6,74	Zn	Цинк	1,9
	Молибден	6,7			

Таблица 21.23. Микроскопические параметры некоторых сверхпроводников [18]

Элемент		нм	X, им
A1	Алюминий	1600-1360	16—50
Cd	Кадмий	760	ПО
Hg	Ртуть	—	38-45
In	Индий	354—240	64-39
Nb	Ниобий	38	39
Pb	Свинец	96-51	39-63
Sn	Олово	300-100	34—75
Tl	Таллий	420	

Таблица 21.24. Сверхпроводимость бинарных соединений [16]

Состав	T_c, К	Состав	T_c, К
	Кубическая структура A15		
TiglR	**4,63-5,40**	NbsOs	1,05-0,94
TigPt	**0,48—0.58**	NboPb	9,6
TisSb	6.5—5,7	NbsPt	10,9—8,18
ZroAu	0,92	NbgRh	2,64—2,4
ZrsPb	0,76	NbsSb	1,9—0,4
ZrsSn	0,94-0,76	NbgSn	18,1-18,5
V3Al	11,65	Taз Au	0,51-10
V3AU	3,15-2,97	Taз Pb	17,0
VaGa	14,6-16,8	TagPt	0,40
VsGe	6,3	Taз3b	0,72-0,59
Vsin	13,9	Taз3n	6,4
	1,71	CrgIr	0,83
	5,15-4,49	Cr3Oз	4,25-4,03
V,Pd	0,082	Cr4Rh	0,072
v^t	3,27-3,20	Cr3Ru	3,43
VsSb	0,80	IviogAl	0,58
VgSi	17,2-17,0	Moз Ca	0,76
VsSn	7-3.8	Moз Ce	1,43
NbgAl	18,5—18,8	Mosir	9,6
NbsAu	10,6—11,5	Moз O	4—6.7
NbgBi	3,05	Moз OS	11,76
NbsGa	14,5	Mo.Pt	4,53-5,6
NbgGe	6,9 (23,2 в пленке)	MosRe	15
		MosSi	1,34
Nbsin	9,2		13,5—14
Nbslr	1,76-1,63		0,4-3,35
	Кубическая лаеес-фаза CIS		
BaRhg	6.0	PbAua	1,18
BiAu,	1,84	RbBi,	4,25
Calr^	6,15	RhHfa	1,98
CaRh,	6,40	Sclr,,	2,46
CeCoa	1,5	ScRu,	2,24
CeRua	6,20	Srlr,	5,7
CsBia	4,75	SrPta	0,7
HfMOa	0,07	SrRha	6,2
HfV,	9,4	Thir,	6,50
KBia	3,58	ThRua	3,56
LaAla	3,24	Ylr^	2,18
Lalr^	0,48	YPt,	1,70
LaOsa	6.5	YRhs	1,07
LaRua	4,1	Zrlra	4,10
LaPt,	0,54	ZrV2	8,8
Lulfa	2,89	ZrWa	2,7
LuRha	1,27	CaAuB (C 156)	0,34—0,38
NbBe^	2,15		

Состав	T_c, К	Состав	T_c, К
	Гексагональная лавес-фаза CH		
$HfOs_{„}$	2,69	ThRe^	5,05
HfRe;	5,61	ThTca	5,3
HfTea	5,6	YOsa	4,7
LuOs..	3.49	YRe,	1.83
LuRua	0,86	YRU2	2,42
ScOs,	4,60	ZrOsj	3,0
ScRe,	4,2	ZrRe,	6,8
ScRu;	2,24	ZrRuo	1,84
TaVa	10,0	ZrTea	7,6
	Тетрагональная a-фаза		
Zr.jlr	2,13	Cr5Ru3	2.10
VRe,	6,26	Mo,lгз	6,8
Nb^Ir^	9,8	M05OS3	5,65
NbsOs,	1,86	MogReg	6,5
Nbji-Pdv	2,0	M05RU3	9,2
Nb,Pt'	4,2		15,8
NbRe	3,8		4,46
NbgRh,	4,1	W°Os3,	4,4
Ta,Pt4	1,5	W^Rey	5,2
Ta,Re3	1,4	W3RU,'	4.67
TagRha	2,35		7,88
Cr2Re3	2,50		6,55
	Кубическая x-фаза A12		
AURe^i	3,35	Sc^Re^i	**2,2**
	5,86	TaOs	1,95
R K ? '	2,86	Ta5Re24	6,78
	2,47		**6,6**
	9,7		9,0
NbTc	10,5		7,40
MoReg		***ItT***	9,7

Кубические структуры

Тип **структуры**	состав	^c' К	Тип **структуры**	Состав	
B1	GeTe	**0,04-0,31**	**B2**	LiPb	**7,2**
	AsSn	**3,41—3,65**		**Mgo.47Tlo.53**	**2,75**
		1,23-1,16		OsTi	**0,46**
	tbt"^	**1,3—2,37**		RuTi	**1,07**
B2	InPd	**0,70**		TiCo	**0,71**
	LaAg	**0,92-0,96**		TiO	**2,3-0,58**
				UCo	**1,70**

Тип структуры	Состав	. . . »	Тип структуры	Состав	г^, к
B20	AuBe	2,64	08^		0,64
	GaPt	1,74	OOз		0,127—1,84
CI	AuAla	0,095-0,074	Шз	RijBe,3	1,3
	AiiGa,	1,12—1.05	07з	LagSi	6,5-8,25
	Auln.	0,096—0,093		La3Se4	8,6—1,25
	CoSia	**1,22-1,4**		La3Te4	2,45-3,75
	PtGaa	**1,7-1,9**	Сложные	Be^aRe	9,65
	PRh,			BerrTc	5,25
	PtA'.a	0.48-0,55		Be,2Mo	2,529—5,545
C2	**AuSba**	0,58			4,038-4,12
	a-PdBio	1,45		ÁgÀ£4	0,4—0,7
	IrTe,	**0,3—1,18**		AgTb	2,6
	PdSba	**0,35-1,25**		AuZn3	1,21
	RhSe2	**6,0**		HgsTla	**3,14-3,8**
	a-RhTe^	**0,51**		In Cd	**3,0-3,55**
E9з	CoHfa	**0,56**		PdasS	**1,63**
	CoTia	**3,44**			**5,8**
	RhHfa	**1,98**			**5,20**
	RhZrg	**n**		•V-SnTl	4,2—6,4
LI,	**AlLaj**	**6,16**	**Нитриды**	TiN	4,86-5,8
	AlZrg	0,73		ZrN	8,9-10,7
	CaPbз	0,65		HfN	6,2-S,7
	CaTlз	2,0		VN	7,5—^-,2
	BiTb	4,15-4,4		NbN	16,1
	InLag	10,40		TaN	4,84—6,5
	InLus	0,14-0,24		Mo,N	5,0
	Lalnj	0,70-0,71			4-5
	LaPb3	4,07—4,10		**ThN**	3,2
	LaSnj	6,02-6,55		**UN**	5,6
	LaTlg	1,51-1,63	Карбиды	a-MQ	9,26-14,3
	blaPbз	5,62		NbC	1,05-11,7
	LuCas	2,30		ReC	3,4
	SiNbs	1,5		S c ^ .	8,5
	SrBij	2,62-5,70			1,05-11,2
	SrPbj	1,85		TcC	3,85
	ThPbj	5,5		TiC	3,32-3,42
	ThSng	3,33		**vc**	0,03
	ThTlg	0,87		p-WCr	5,2-10,0
	YIns	0,78		PdH	5
	YPbg	4,72	Гидриды	PdH,	16
	YT!3	1,52		HfB	3,1
	YbAlg	0,94	Бориды	ZrB	2,8-3,4
	YbPbg	0,23			
	ZrHg3	3,28			

Гексагональные структуры

AgaAl	**1,28-o,088**	B8,	PdSb	1,44-1,67
AfeGa	6,5-8		PdT!	3,85
Ag4Ge	0,85		PtSb	**2,10**
AgsSb	0,019-0,065		PtSn	0,37
AgsSn	0,025-0,107		Bilna	5.6
AujIn	0,035-0,331		MoB,,	1,0-6,4
AusSn	0,4-1,1		?-ThSia	2,41
CusGe	0,025-0,26		YGaa	**1,68**
CusSi	0,050-0,058	DO„	AlTh	0,75
Pb^Bi	8,2-8,5		CdgMg	0,185
RhW	2,64-3,37		HgsLi	1.7
RhMo	1,97	D2d	Lairs	2,13
AuSn	1,25		BaAus	0,7-0,35
BiNi	4,25	D8e	Zr.Gag	2,5-4,0
BiPda	4,0		Zr^Pbo	4,60
BiPt	1,21-2,4		Zr^Sb^	1,74
BiRh	2,06			

Тип структуры	Состав	—	Тип структуры	Состав	*T^*, к
D102	B3RU7	2,58	Сложные		3,05
	CozTb,	1,83			3,52
	FegTh,	1,86		e-MoRha	1,97
	IrsLa,	2,24			1,49
	IrgLu,	0,72			0,66
	IrgTh,	1,52		Pd^As,	0,46
	NigTh,	1,98			2,8
	o4tь.	1,51			4,25-4,38
	PtgTh,	0,98		TbBis	6,4—6,6
	RhsLa,	2,58		HgSng	5,1
	RhgTh,	2,15	Нитриды	Ta^N	10,6
B8,	PdaSn^	0,47-0,64	Карбиды	MoN	12,0
	Zn^Rh	8,2—6,4		P-M03C	2,4—7,2
CI	NbSa	5,4—6,15		Yj-MoCj,	7,4-9,26
	NbSea	5,4—7,5		VMoC	7,6-8,3
	NbTea	0,5-0,74			1,98-9,11
	TaSa	0.71—2,1			1,9—2,0
	TaSea	0,13-0,22		**Ta,C**	3,2—3,3
B18	CuS	1,62		**a-WgC**	2,74—3,6
	Ag.F	0.066	Бориды		2,85—3,05
Сложные	AsRh4_i.6	0.03-0,56			8,1
	P-BiaPt	0,155		**NbBa**	1,0-6,4
	T-B^Rh	2,70		**Nb^Bs**	6,4
				Re^B	**2,80**
				Ru,B3	**2,58**
		Тетрагональные структуры			
	AgZna	2,11-2,46	D2c		2,29—2,4
	AgTha	2,19—2,26		Fel	3,86
	AlTha	0,09		Mr	2,32
	AuPba	3,10-3,15		NiUe"	0,41
	AuTha	3,08-3,65		a-LiBi	2,47
	AuTU	4,2		NaBi	2,25
	CoTaa	**0,82**		CaSia	1,58
	CoZra	5,0-6,30		LaGe^	1,57-3,49
	CuAb	0,65		LaSi,	2,3—2,5
	CuTha	3,44-3,49		ScGe,	1.3-1,31
	GaHf.2	**o,21**		Sr^Sia	0,55
	GaZra	0,38		ThGa^	2,56
	FeZfa	0,17		<x-ThSia	3,16-3,20
	NiHfg	0,87			2.4-3,8
	NiTa^	0,90			2,30
	NiZr^	1,52—1,6			1,0
	PdPba	2,95-3,01		ThgAla	2,6
	PdTha	0,75—0,85		BaBi3	5,8
	PdTla	1,32			2,28-2,078
	PtTU	1,58			7,3
	RhPba	1,32			4,40
	RhSna	**0,60**		GeP	1,8—4,2
	RhZra	**10,8-11,1**		Pd4Se	0,42—0,66
	ZrTha	0,67	Бориды		0,06-3,12
DOc	M03P	5,31		W2B	3,10-3,22
	W3P	**2,26**		M02B	4,74—5,86
		Ромбические структуры			
B31	AsRh	0,58	B31	SnPd	0,41
	Geir	4,70		SbRu	0,35—1,27
	GePt	0,40	Орторомбичес-	PtTh	0,44
	GeRh	0,96	кие	RhTh	0,36
	SiPd	0,93		AuSn4	2,38
	SiPt	**0,88**		PtPbi	**2,8**

Тип структуры	Состав	"с. к	Тип структуры	Состав	г^, к
Орторомбические	**C0LU3**	0,35	Ромбоэдрические	<X-Pd,P3	0,70
	CoLaa	4.01		P-Pd,P3	1,00
	BigNi	4,06	Сложные	2гэАи	0,98
	BigRh	3.2		AuSn	2,48
	AlReg	1,85			1,16-1,19
	Pd^Sn	0,41			2,12
	BiPd	3,74-3,42	Карбиды		2,4-7,2
		1,2			3,1—3,90
	PtW^	0,59	Бориды	TaB	4,0
	RhePi	1 22			
Ромбоэдрические	**1пзТе4**	1.15-1,25			
		1,80—1,55			
		1.16-1,21			
		1,24—1,10			
		1,47			

Продолжение табл. 21.24

Другие типы структур и соединения, для которых тип структуры точно не установлен

Состав	7-^, к	**Состав**	к
PdTej	1,53-1,69	OsBea	3,07
P-PdisAs	1,71	PPb	7,8
	1,7	P2.65Sn4	1,21-1,10
	5,9	Pd2.5-2.8Se	2,20—2,30
	0,4-0,6	PdgTe	0,76
NbRus	**1,2**	PdsTe	0,40
AsGe	**3-3,5**	PtsTh	3,13
Be,Ca	**6,7**	RhBea	1,37
Beglr	**1,5**	RhSc3	0,32—0,92
BejOs	**9.2**	Rh^Te	0,49
BeoPt	**2.3**	RhsTh	1,07
CaPb	**7,0**	RuBe^	1,35
Celrg	**3,34**		**1,60**
CeIгв	1,82		**0,34**
CoSe	0,35		**3,50**
Ge,Se	1,3-1,31		**0,020-0,135**
	3,18		**0,39—0,55**
	3,27		5,9—11,0
InsRu	3,42		1,61-3,33
	o Rt	RbCg	0,023—0,151
	1,61	Th^Ca	4.1
Lairg	2,46		8.2
LaRhs	1,65	w S	2,4—4,05
LaRl^	2,60	YaCs	6,0-11,5
Lulrj	0,84	YC,	3,35—3,88
LURHb	0,49	NbB	8,25
Mo3Sb4	2,10	NbB„	3?
Nb>4	1,61	zre/.	5,9-6,0

Таблица 21.25. Сверхпроводимость соединений, имеющих техническое применение [16]

Соеди-	К	**А/См» (Т.а). при 4,2 К**	***Тл (Т. К)***
	18,1-18,5	(1-8) - 105 (0)	24,5-28 (0)
	9,5-10,5	(3-8) . 10^ (5)	12,5-16,5 (1,2)
			12 (4.2)
NbN	14,5—17,8	(2-5) • 10' (18)	?5 (1,2)
			8—13 (4,2)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Undolt-Bornstein. Zahlenwerte und Funktionen, **II BD,** 6 Teil, 6 Auflage, Berlin—Gottingen—Heidelberg: Springer-Verlag. 1959.
2. Stewart G. R.//Rev. Sci. Instrum. 1983. Vol. 54, N 1. P, 1-10.
3. Макдональд Д.//Физика низких температур: Пер. с англ./Под ред. А. И Шальникова. М: Изд-во иностр. лит. 1959.
4. Handbuch der Physik. Berlin—Gottingen—Heidelberg. 1956. Bd XIX.
5. Смителлс К. Дж. Вольфрам: Пер. с англ Л,—М.: Металлургиздат. 1958.
6. SouLe D. E//Phys. Rev. 1958. Vol. 112. P. 698—705.
7. Primak W., Fuchs L. H. Phys. Rev. 1954. Vol. 95. P. 22—31.
8. Spain J. L, Ubbelohde A. R., Young D. A.//PhiL Trans. Roy. Soc. 1967. Vol. 262, N 1128. P. 345—360.
9. Landolt-Bбrnstein/.Zahlenwerte und Funktionen, 6 Auflage, Springer—Verlag, 1957. IV Bd, 3 Teil
10. Техника высоких температур. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1959.
11. Справочник по электротехническим материалам. М.—Л.: Госэнергоиздат. 1960.
12. Готман П. **Е.**, Березин В. Б., Хайкин А. М. Электротехнические материалы. М.: Энергия. 1969.
13. Металловедение и термическая обработка/Под ред. акад. Н. Г. Гудцова. М.: Металлургия. 1966.
14. Краткий справочник металлиста/Под ред. проф. А. М. Малова. М.: Машиностроение. 1965.
15. Савицкий Е. М., Тылкина М. Л., Поварова К. Б. Сплавы рения. М.: Наука. 1965.
16 Сверхпроводящие материалы. М.: Металлургия. 1976.
17. Коэн **М.** и др. Сверхпроводимость полупроводников и переходных металлов: Пер. с англ. М.: Мир. 1972.
18. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела; Пер. с англ. М.: Наука. 1978.

19. Schooley J. F.//J. Phys. 1978. Vol. 39, N C6. P. 1169.
20. Utton D. B., Soulen R. J., Marshak H.//Low Temp. Phys. 1975. Vol. 4. P. 76—85.
21. Durieux M., Astrov D. N., Kemp W. R. G., Swenson C. A.//Metrologia. 1979. Vol. 15. P. 57—72.
22. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат. 1976.

Глава 22
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

С. д. Лазарев. Е. 3. Мейлихов

22.1. ВВЕДЕНИЕ

Вещества, в которых при 7'=0 К верхняя из запоЛf ненных электронами энергетических зон (валентная зона) и нижняя из незаполненных электронами энергетических зон (зона проводимости) не перекрываются, являются полупроводниками или диэлектриками. Граница между ними весьма условна — в полупроводниках энергетический зазор между зоной проводимости и валентной зоной не очень велик, что приводит к появлению в зонах заметного числа свободных носителей заряда при ***T^O*** К.

Обычно удельное сопротивление полупроводников (при 7=290 К) находится в интервале 10-з<:р<10" Ом-см (в металлах р= 10-^-^10-^ Ом-см).

Характерными чертами этого класса веществ являются рост электропроводимости с температурой, малая (по сравнению с металлами) концентрация носителей тока, высокая чувствительность электрических свойств по отношению к воздействию излучений и наличию примесей, а также неомическое поведение контактов.

Ширина запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны Eg представляет собой энергетический зазор между абсолютным максимумом валентной зоны и абсолютным минимумом зоны проводимости. Определяется по температурному ходу сопротивления или оптическими методами (край полосы поглощения, длинноволновая граница фотопроводимости). Значение Eg зависит от температуры и давления; зависимость определяется коэффициентами ***аг = dE^/dT*** и ***ар = dEJdP.***

Подвижность носителей и проводимость. Дрейфовая подвижность Цдр=ь>„р/£, где I>hj — дрейфовая скорость носителей в электрическом поле ***E.*** Определяется прямыми опытами по времени распространения инжектируемого импульса неосмовных носителей Б образце. Удельная проводимость о связана с дрейфовой подвижностью (х„ (Хр электронов и дырок и их концентрацией п и р соотношением а=е(nu„+pu„). Измерение эффекта Холла позволяет определить холловскую подвижность (Х/,= |/?а|, где ***R*** — коэффициент Холла.

Эффект Холла. В полупроводнике, который помещен в магнитное поле, перпендикулярное протекающему по нему току, возникает электрическое поле, перпендикулярное току и магнитному полю. Это — так называемый эффект Холла, описывае.>1ый соотношением

E^^RIH,

где Ей — напряженность холловского электрического поля; / — плотность тока; ***H*** — напряженность магнитного поля; ***R*** — коэффициент Холла.

В случае носителей одного сорта (концентрацией ***n)***

R = ± rjne.

Здесь ***R*** измеряется в см'/Кл; п — в см-'; е= 1,6- Ю"'® Кл; г —числовой множитель (так называемый холл-фактор), значение которого определяется механизмом релаксации импульса носителей. Знак ***R*** связан со знаком заряда носителей (/?<0 в образцах га-типа, ***R>Q*** в образцах р-типа).

При наличии двух сортов носителей (например, электронов и дырок) ***R*** зависит от напряженности магнитного поля:

$$R = \frac{(=П + \quad + \quad \{Rn + Rp)}{}$$

Здесь а„=пе(х„; ар=ре(Хр; /?„=—1/rae; R^^ijpe.

При Н- $R \to \frac{e(p - n)}{}$ если ***pfn,*** и

$$R = —\bullet$$ если

пе \xp 4-

Холловская подвижность носителей Ци определяется соотношением [хн= | |.

Время жизни носителей. Время жизни т представляет собой время, за которое неравновесная концентрация носителей спадает за счет их рекомбинации до равновесного значения. Основные механизмы рекомбинации — излучательный (энергия рекомбинирующей пары электрон-дырка излучается в виде фотона), фононный (энергия передается решетке), ударный (энергия пары передается третьей частице).

Чаще всего имеет место не прямая рекомбинация, а процесс идет через рекомбинационные центры (примеси, дефекты).

Теоретическая оценка времени излучательной рекомбинации Тг дает верхний предел значения т. Для 7'=30Ci К и концентрации, близкой к собственной, значения Тг приведены в табл. 22.1. Здесь же приведены реальные значения т.

Таблица 22.1. Время рекомбинаций т и время излучательной рекомбинации для некоторых полупроводников [162] (концентрация носителей близка к собственной, Г = 300 К)

Ce	InSb	InAs	PbS	PbSe	PbTe
3	0,3	3-10-'	10-5	10-6	3-10-в2-10-«
2-10-3	3-10-3	3-10-'	10-'	lO-s	— —

Поверхностная рекомбинация. Помимо рекомбинации в объеме носители могут рекомбинировать на поверхностн полупроводника. Скорость поверхностной рекомбинации S определяется как скорость потока частиц из объема к цоверхности, необходимого для поддержания на ней избыточного числа неравновесных носителей. Скорость s сильно зависит от способа обработки поверхности. Так, для Ge при травлении поверхности в кипящей H2O2 s«10 см/с, а при шлифовке 10® см/с и более. Обычно 10^4-10'см/с.

Длина диффузии. Длина диффузии ***Lo*** — расстояние, характеризующее пространственный спад неравновесной концентрации носителей до равновесного значения. Значение ***Ld*** определяется через коэффициент диффузии ***D*** и время жизни т с помощью соотношения Lo^y^Di. Коэффициент диффузии и подвижность связаны соотношением Эйнштейна (в невырожденном полупроводнике). Максимальная длина диффузии характеризует степень совершенства и чистоты кристалла. При Г=300К Z.**D**=0,5 см в Ge, L**D-0**,3 **CM B** Si, Ю-^н-1О"' см в InSb [162].

Структура ЗОИ и эффективные массы. Эффективная масса носителя характеризует его движение в кристаллической решетке. Обратная эффективная масса (от*) »— тензорная величина, определяемая зависимостью ***E(p)*** энергии носителя от его квазиимпульса:

$$(/л^{*})Y> = d^{2}E(p)ldpi\,dpi.$$

Обычно достаточно знать вид E(p) лишь вблизи экстремальных точек — минимумов или максимумов энергии. Изоэнергетические поверхности вблизи экстремумов часто представляют в виде сфер (с эффективными массами, например, для нескольких подзон валентной зоны Отр,, /Пр2 и т. д.) или эллипсоидов (с эффективными массами для зоны проводимости ***m„ /|, mnXi, m„X2*)-***

Для анализа различных экспериментальнйх данных часто пользуются понятием скалярной эффективной массы плотности состояний {mdn и тар для электронов и дырок соответственно), которая в случае эллипсоидальных изоэнергетических поверхностей находится из соотношения '

где ЛГ —число экстремумов зоны.

В случае энергетических зон, имеющих вырожденные сферические поверхности постоянной энергии с эффективными массами ПрiпiОтвг и т. д., эффективная масса плотности состояний определяется следующим образом:

тар

Вводятся также понятия омической эффективной йассы пч и циклотронной эффективной массы Шс, определяемые соотношениями

'11

(эллипсоидальные изоэнергетические поверхности),

$$\textbf{Шс-}_{2,t}\frac{\partial E}{}$$

(S —площадь сечения изоэнергетической поверхности плоскостью, нормальной к магнитному полю).

Общие выражения для та, то , тс см., например, в [84].

Прямым методом определения ^(р) и эффективных масс является циклотронный резонанс. Ценные сведения структуре и эффективных массах дают измерения анизотропии магнетосопротивления, эффектов типа Шубникова — де Гааза и магнетооптических эффектов.

Собственная концентрация носителей. Собственная концентрация носителей щ соответствует идеально чистому материалу и вычисляется, если известна структура ЗОИ и эффективные массы, по формуле

$$/mdn^{dp}\ \backslash_{3}/4 \qquad \textbf{(Eg-^}$$

$$\textbf{: 4,82-101®} \qquad \textbf{2kT}$$

где/Пйп, /Пйр — эффективная масса плотности состояний электронов и дырок соответственно; /По — масса свободного электрона; ***k*** — постоянная Больцмана; ***am*** — коэффициент температурной зависимости ширины запрещенной **зоны.**

Обычно гii определяют экспериментально по данным измерений эффекта Холла и проводимости в соответствующем интервале температур.

Температура Дебая ***To*** определяется через граничную частоту (nm колебаний решетки с помощью соотношения:

kT,

Различным ветвям колебаний соответствуют, вообще говоря, различные ;!начения температуры Дебая. Значения ***To,*** определяемые из тепловых измерений, являются усредненными но существенным при температуре измерений ветвям колеоании. Более детальную информацию дают, например, измерения упругих констант.

Предельная частота оптических фононов ***ш, ш*** есть частота соответствующих (продольных и поперечных) оптических колебаний решетки с длиной волн, значительно превышающей межатомное расстояние. Определяется из спектров поглощения и отражения инфракрасного излучения, а также с помощью нейтронной спектроскопии. Для элементов (Si, Ge и др.): и/={0(=й)о.

Фактор спектроскопического распределения ***g*** в зоне проводимости (или валентной) определяется расщеплением энергетических уровней носителей в магнитном поле за счет их магнитного момента

1,2 ... ,

где сй« — циклотронная частота носителя заряда в кристалле, определяется из измерений осцилляционных эффектов в магнитном поле методом пара- и ядерного магнитного резонанса.

Диэлектрическая проницаемость. Значения диэлектрической проницаемости во и &оо получают из статических и высокочастотных (или оптических) измерений соответственно. В таблицах везде, где не отмечено специально, приводимые значения относятся к Г-290 К.

В таблицы в основном включены данные о полупроводниках с Eg<2, эВ. Тройные и более сложные полупроводниковые соединения не описаны *. Не приведены также сведения о параметрах различных полупроводниковых приборов

22.2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

22.2.1 Кремний и германий

Кремний и германий — широко используемые и наиболее исследованные полупроводники. Кристаллизуются в решетке алмаза. Имеют сложную зонную структуру.

^ Часто употребляется обозначение ='"11= классов тройных соединений —

Таблица 22.2. Электрофизические свойства элементарных полупроводников [293]

Элемент	Кристаллическая структура		р, г/см»		Eg, sB	dEg/дТ. 10-* эБ/К:
	Система, группа	a. b, c, им				
a-B	Ромбоэдр., Dla	0,5057 (C), . = 58° 06'	2.45	2350-2400	1,97 (E ⊥ c) 1,90	
р-в	То же	1,014 (a), a = 65° 17'	2,33	2350-2400	1,63 (£||c) 1,61 (£j_c) 1,56 (О К)	
c (алмаз)	Куб., Of	0,3566 [1]	3,51 [123J	4300 f123]	5.4 [28] 5,48 [292]	—1.2 -0,5
Р (черный)	Орторомб., oil	0,331 (a): 0,437 (b); 1,047 (c)	2,70	1300	0,33 (О К)	-2.8
a-S	Орторомб..	1.046 (c); 1,288 (b); 2,448 (c)	2,069		3.8	
As (серый)	Ромбоэдр.,	0,376 (a); 1,076 (c)	5,72	1090	0,175	
Se		0,435 (a): 0,494 (c)	4.819	490	1.9 (5 К)	—2,7
«-Se	Моноклин.	0,905 (a); 0,907 (b); 1,161 (c)	4.9		2,48 (5 К)	
a-Sn	Куб., 01	0,649 [292]	7,28 (2921	505*2 [121]	0,09 [122]	- 5 [122]
Sb	Ромбоэдр., D^	0,4308 (a); 1,1274 (c)			0,1 (1 ,15 К)	
Te	Триг.. D*; D%	0,446 (a): 0,595 (c)	6,24		0,335 (4,2К)	+1,8(Г<4,2К) —0,4{100-300к)

	m_n/m_n		cmV(B-c)	l^p. см«/(В с)		^co	
1430 (0 К)				120			
1220 (100 К)	4,5	1,8	1 [И]	300	11,55 (£xc); 10,24 (£ ⊥ c)	9,12 (£xc); 8,41 (E ⊥ c)	–
1300 (0 К)							
2240*1 [123]	1.4 (m;) [313]	2.35*3 [15]	[11]	1400(~Г-3/2) [123]	5,7 [292]	5,7 [121]	
	0,36 (mt)	2.1 [123]					
400	0,16 (m_ni) 0.81 ($«_n$r) 0,24 ($т_n$з)	0,17 (mpi) 0,71 (mpa) 0,59 (трз)	220	350		-	–
250			7.5	10	3,6—4,6 (анизотропна)		
250 282 (4,2 К)	0,134 (m_ni) 1.252 (m,2) 0,141 ($т_n$з)	0,146 (mpi) 0,104 ($m^_n$) 0,166 (mpa)	40-550 (анизотропна)	50-1210 (анизотропна)	50		2,16.10=«'
152,5		1,4 (ma)		40			101^
171 (0 К)							
128 (<20 К)			4 (~T-3/2)	0,2	7,39	6,1	
230 [121]	0.023 [122]	0,26 [122]	2500 [11]	2400 [11]		24 [292]	
		0.20*« 1292]	105 (78 К) [238] 105(4,2 К) [238]				

To. к			CMV(BC)	*сыНе-с)*		e..	«., см-2
168 (10 К) 211(0 **К)**	0,068 («„!) 0,63 (т„2) 0,34 *(тпз)*	0,093 (m„)i 1.14 (mpa) 0,093 (/лрз)	0,11—2,74 (анизотропна)	0,18—3,63 (анизотропна)	80 (4.2 К)	-	4,2-10'»
140 (J.C) [220]		0,114 (mj^)	2380 (11 *с)*	1260 (II *с)*	–	23 (хс) [28]	5,6-10^5
290(11 с) [120]	0,05 *(т* II)	0.109 (m II)	1150(1 *с)*	650 (J. с)			

" ft = = 0.165 эв г 123]
Переходит в р- Sn при 558 К.
•3 Тяжелые дырки. Для легких дырок T^/Шд = 0,7 [313].
«« Тях;елые дырки. Для легких дырок Bтр/m„ = 0,06 [292[

Таблица 22.3. Электрофизические свойства Si и Ce

Эле-менг	Кристалличес[ая структура Система, группа	*0.* нм [123]	Г/СМ5'[123]	К ГПТ3]	*TD* , К [117]	*Гг'^о.* эВ. [123]	ю [28]	
Si	**Куб., 01**	**0,543**	**2,33**	**1690**	**689** **539 (80 К)**	0.**063**	**11.7**	**12,7 (X=1,05мкм) [28]** **13,7 (X = 8 мм) [117]**
Ge	**То же**	**0,566**	**5,32**	**1210**	**406** **353 (80 К)**	**0,037**	**16**	**16,5 (X = 2.5 мкм) [28]**

Эле-кент	зВ [292]	£гл- -в	iSrA- эв	A^o- -в	*dE^/dT,'*	*OE^/dP.* 10-е эВ/бар	*dErJdT.* 10-4 **эв/К**	*dErJdP.* 10-« эВ/бар	' а£ГД/**ар,** **10-"** эВ/Па (10-« эВ/ат)
Si	**1,11** **1,17 fO К)**	**2,3[84]**	**1,5 [84]**	**0,044 [123]**	**- 2 , 8**				
Ge	**0,664** **0,744 (1,5 К1**	0,а5 [123] **0,**15 **[84]**	**0,02[123]**	**0,28 [117]** **0,30 [123]**	**—3,7**	**3 [2^**	**- 4** [123]	**7** [123]	**—(12—14) [123]**

Эле-менг	*7m*	1	lё	1	£	£	S ?	1 Я		см=/"вс,	CMV(B • C)
Si	**0,9163** (II) **0,1905**(X)	**0,33**	**0,26**	**0,537**	**0,153**	**0,25**	0,81 **[292]**	**1,02**-10»o **(300 К)**	**2,3-10^**	**3000**	**500 [123]** (-^Г-2-3) **[117]**
Ge	**1,588(11)** **0,0815** (X)	**0,22**	**0,12**	**0,34**	**0,043**	**0,08**	**[123]**	**2,33-10"** **(300 К)**	**47**	**3800**	**1820 [123]** **[28]**

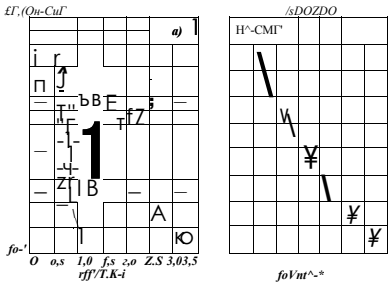


Рис. 22.1. Температурная зависимость удельной проводимости а-В(а) и р-В(б):
пунктир — асимптотическое приближение при Яо-1 эВ; Д —гранулы; А — кристаллы; О — поликристалл

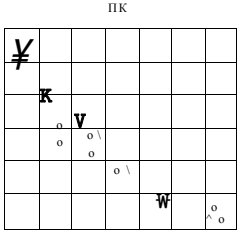


Рис. 22.4. Температурная зависимость дрей^ движности электронов в Р-В [293]:
пинин — расчет по разным моделям

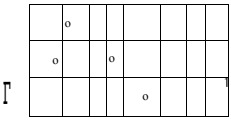


Рис. 22.5. Зависимость холловской подвижности электронов в поликристаллическом р-В от концентрации носителей *17,* 141

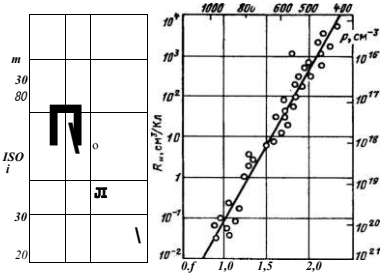


Рис. 22.2 Рис. 22.3

Рис. 22.2. Температурная зависи.мость чолловской подвижности дырок в а-В [6]

Рис. 22.3. Температурная зависимость коэффициента Холла и концентрация дырок в Р-В при высоких температурах [293]

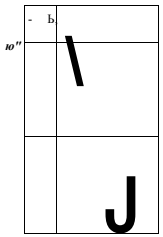
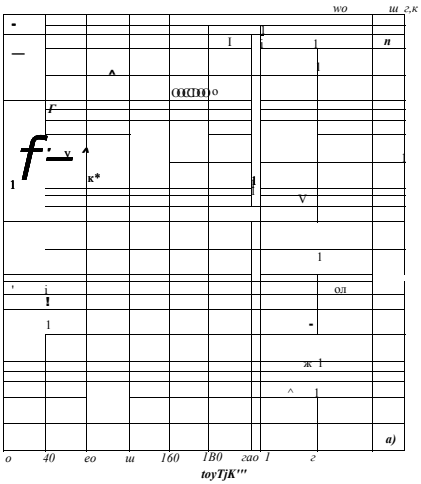
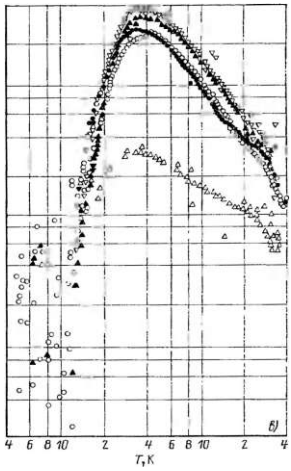


Рис. 22.6. Температурные зависимости подвижности электронов (а) и дырок (б) в алмазе [313]





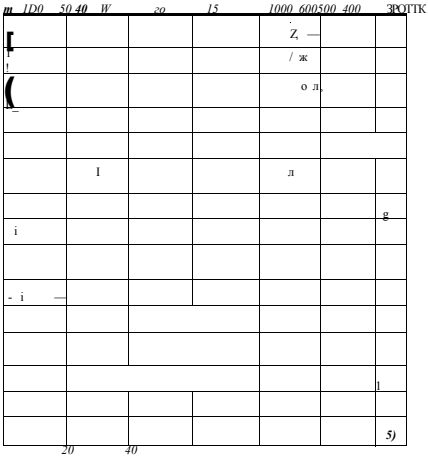


Рис. 22.7. Температурные зависимости удельного сопротивления (о) полной концентрации носителей (б) и холловской подвижности дырок (в) в поликристаллическом черном фосфоре [17]:
I — низкие температуры; *I!* — высокие температуры

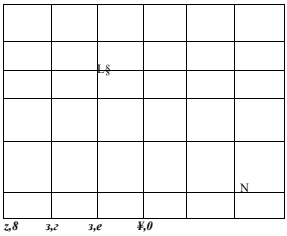


Рис. 22.8. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в a-S[37]

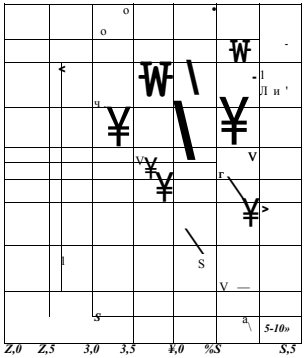


Рис. 22.10. Температурная зависимость дрейфовой по^ движности дырок в a-S для образцов с различной концентрацией дырочных ловушек п,. При фазовом переходе a-S—>-p-S подвижность резко уменьшается [53]

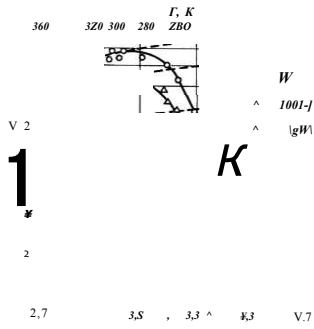


Рис. 22.9. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок вдоль различных кристаллических осей в a-S [39]:
пунктир - зависимость Цсо?-". где n=1,6 [100], п-1,1 [010]. п-1.7 [001]

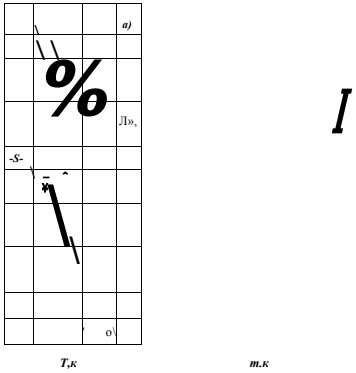


Рис. 22.11. Температурные зависимости подвижности электронов и дырок *(а)* и удельного сопротивления (б) в As. Характер зависимости (Лщ, и цр. ^х>Т-^.\

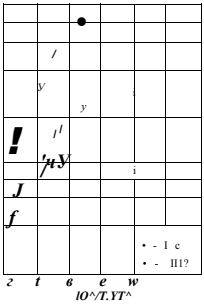


Рис. 22.12. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в тригональном Se [19]:
пунктир соответствует зависимости Т-Ц^



Рис. 22.14. Зонная структура a-Sn [171]

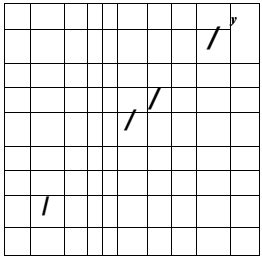


Рис. 22.15. Зависимость концентрации электронов a-Sn при 7"=4,2 К от концентрации доноров [24]:
О — легкие электроны: « — все электроны

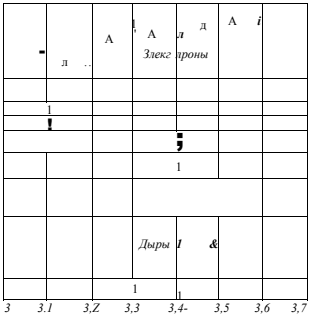


Рис. 22.13. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок и электронов в моноклинном Se (£л — энергия активации подвижности дырок) [20]

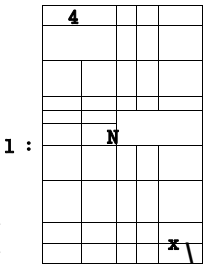


Рис. 22.16. Температурная зависимость подвижности легких электронов и дырок в a-Sn:

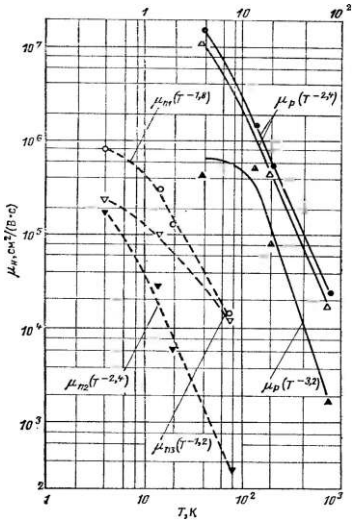


Рис. 22.17. Температурные зависимости компонентов тензора подвижностей электронов (пунктирные линии) и дырок (сплошные линии) в Sb [29]. Концентрации электронов и дырок — 4-10'® см"^:
нижняя шкала температур для μ_n, верхняя — для μ

В Si 6 эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [100] внутри зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов изоэнергетические поверхности имеют вид эллипсоидов вращения (число эллипсоидов — 6).

В Ge 8 эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [111] на границе зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов изоэнергетические поверхности — эллипсоиды вращения (эквивалентное число эллипсоидов 4).

Валентные зоны Si и Ge расщеплены на три подзоны, две из которых вырождены в точке ***k=0, а*** третья отщеплена за счет спиноорбитального взаимодействия.

Схемы энергетических зон Si и Ge (с использованными в таблицах обозначениями) представлены на рис. 22.22, 22.23.

Электрофизические свойства Si и Ge представлены в табл. 22.3—22.5 и на рис. 22.24—22.43.

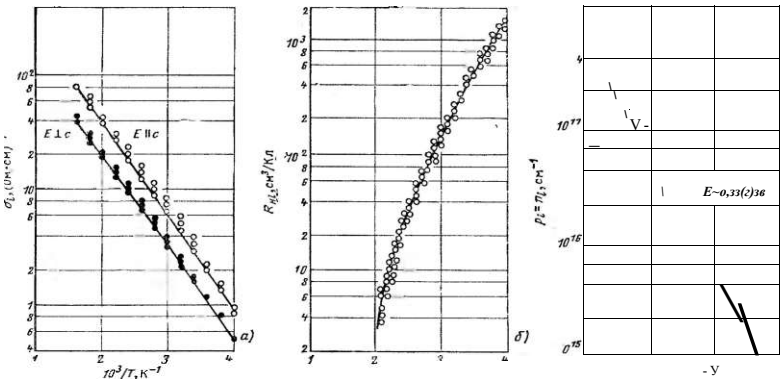


Рис. 22.18. Те-.шературные зависимости удельной проводимости (а), коэффициента Холла ***(б)*** и собственной концентрации носителей ***(в)*** в Те [30]

Таблица 22.4. Свойства примесей в Si [292]

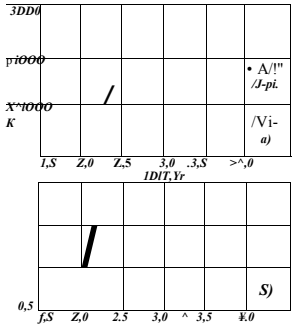
Примесь	Ag		Al	As	Au		в	Bi	Cu
Тип*'	*A*	*D*	Л	*D*	*A*	*D*	*A*	*D*	*A*
	0,93 0,86 0,40	0,59 0,83 0,89	0,068	0,054	0,6—0,7	0,8	0,045	0,071	0,24 0,37 0,52

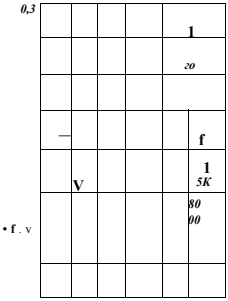
Примесь	Fe	Ga		Li	o	p	s	Sb	Tl	Zn
Типь'	*A*	*A*	Л	*D*	*D*	*D*	*D*	*D*	Л	*A*
	0,4	0,071	0,155	0.034	0.06	0,045	0,31	0,043	0,246	0,316 0,617

Таблица 22.5. Свойства примесей в Ge [117, 123, 292]

Примесь	Al	Ag	As	Au	B	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe
Тип*>	*A*	*A*	*D*	Л	л	*A*	*D*	Л	*A*	*A*	*A*	*A*
Ei, эВ«	0,0111	0,13 0,5 0,7	0,0142	0,16 0,59 0,75	0,0108	0,07	0.0128	0,05 0,15	0,09 0,25 0,48	0,07 0,12	0,33 0,53	0,35 0,52

Примесь	Ga	In	Li	Mn	Ni	o	P	Pt	S	Sb		Te
Тип"	Л	л	*D*	Л	*D*	*D*	*D*	*A*	*D*	*D*	*D*	*D*
Ей эВ*2	0,0113	0,0120	0,0100	0,16	0,3	0,017 0,04 0,20	0,0129	0,2 0,4	0,18	0,0103	0,14	0,11 0,30





(б) в области собственной проводимости Te [30]

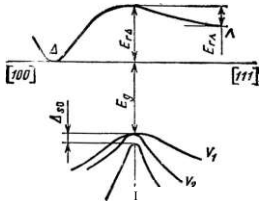


Рис. 22.22. Зонная структура Si [117]

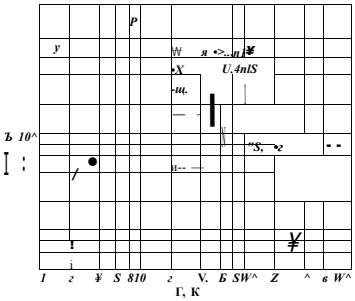


Рис. 22.20. Температурная зависимость подвижности дырок в Te оси с [35]

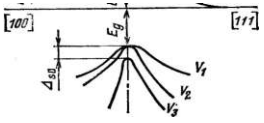


Рис. 22.23. Зонная структура Ge [117]

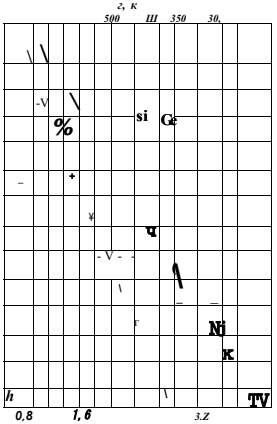


Рис. 22.24 Температурная зависимость собственной концентрации носителей в Ge и Si [221]

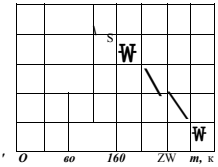


Рис. 22.25 Температурная зависимость ширины запрещенной зоны Si [58j

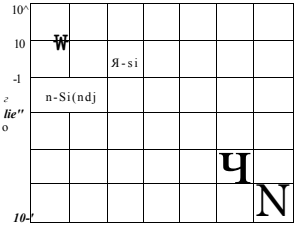


Рис. 22.26. Зависимость удельного сопротивления Si гри 300 К от концентрации донорных или акцепторных примесей [63]

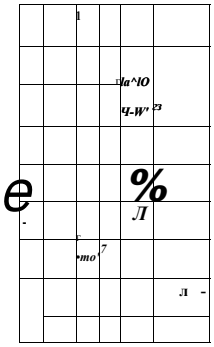


Рис. 22.27. Температурная зависимость подвижности электронов в Si при различной концентрации доноров

сплошная линия — расчет с учетом фонсинного рассеяния электронов; пунктир - асимптотическое приближение



Рис. 22.28. Температурная зависимость подвижности дырок в Si при различной концентрации акцепторов [641: сплошная линия — расчет с учетом фононного рассеяния дырок

>>,0м -си

КОВ
1Щ
то
1Z00
то

е 8 10" Z t Б 8 io"

Рис. 22.29. Зависимости подвижностей электронов и дырок в Si при Г=300 К от концентрации доноров [226]

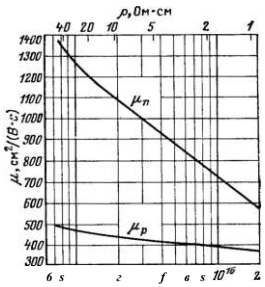
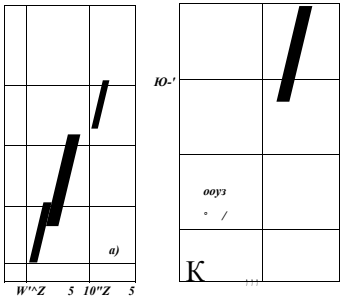
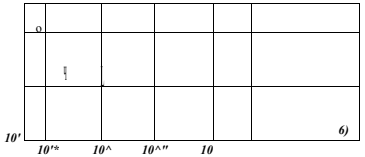


Рис. 22.30. Зависимости подвижностей электронов и дырок в Si при Г=300 К от концентрации акцепторов [226]





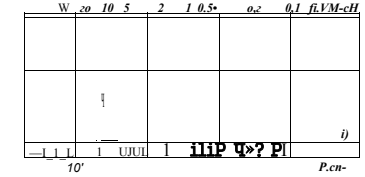


Рис. 22.31. Зависимости времени жизни неосновных носителей в n-Si *(а), p-Si (б),* n-Ge *(в)* и p-Ge *(г)* от концентрации основных носителей при Т=300 К [Ю, 237]

Jn-Ge *p-Ce*

0,05

10«

Рис. 22.32. Зависимость удельного сопротивления n- и *p-Ge* от концентрации носителей при 7=300 К [234]

1D-'

41D-'
8
В
Ч

ч Б В г Б в -/О" ***Б 10'"***
гм-3

Рис. 22.33. Зависимость удельного сопротивления сильйолегированных кристаллов «-Ge от концентрации примесей при Г=300 К [225]

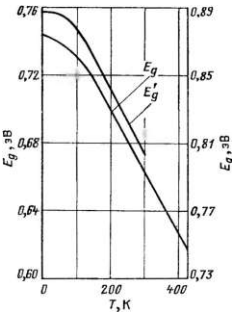


Рис. 22.34. Температурная зависимость энергии прямых р' г. ^ feci Eg и непрямых Eg переходов в Ge [65]

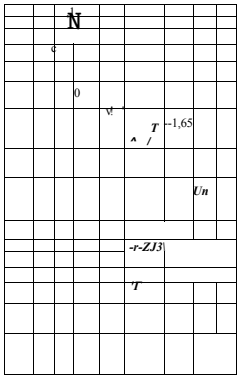


Рис. 22.35. Температурная зависимость подвижности электронов и дырок в чистом Ge при постоянной концентрации носителей [71]

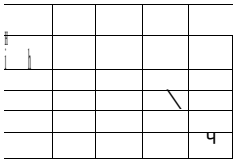


Рис. 22.36 Зависимость дрейфовой подвижности электронов в p-Ge при Г=300 К от концентрации акцепторов: сплошная линия - расчет [72]

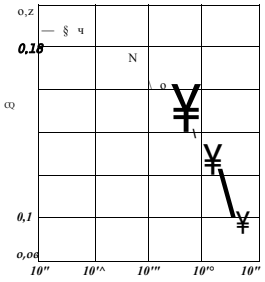


Рис. 22.37. Зависимость дрейфовой подвижности дырок в n-Ge при Г=300 К от концентрации примесей:
сплошная линия — расчет [72]

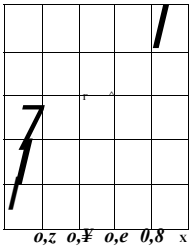


Рис. 22.40. Зависимость ширины запрещенной зоны Si*Gei-* при Т=300 К от состава. При происходит переход от зонной структуры Si к зонной структуре Се [76l

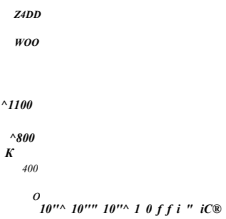


Рис. 22.38. Зависимость холловской подвижности дырок в *p-Ce* при комнатной температуре от концентрации акцепторов [731

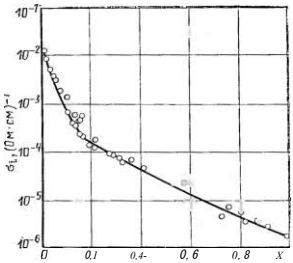


Рис. 22.41. Зависимость собственной проводимости SixGe,-;, при Т-300 К от состава [80]

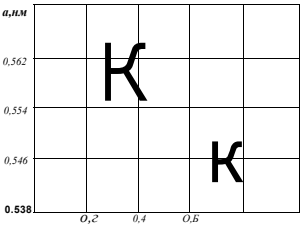


Рис. 22.39. Зависимость постоянной решетки SiiGei- от состава [74]

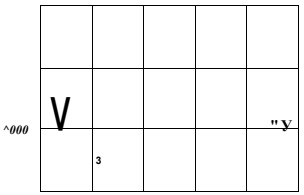


Рис. 22.42. Зависимость холловской подвижности электронов в SbGei-, при Г=300 К от состава [801

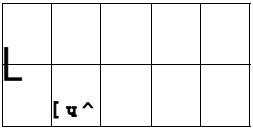


Рис. 22.43. Зависимость холловской подвижиости дырок в SuGe,-^ при Г= 300 К от состава [801

22.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

22.3.1. Соединения типа Л'Б'—Л'Б^и

22.3.2. Соединения типа ЛнБ'^—Л'-Б^п

Из соединений типа наиболее изучены ZnSb и CdSb, а также их твердые растворы, представляющие интерес при создании термоэлектрических устройств. ZnSb и CdSb кристаллизуются в орторомбической структуре приводящей к сильной анизотропии их механических и электрических свойств. Зонная структура непрямая [18, 117]. Минимум зоны проводимости расположен в

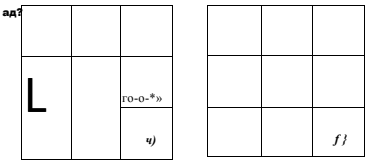


Рис. 22.44. Температурные зависимости удельного сопротивления *(а)* и холловской подви:.сности электронов *(б) в CsAv* (пленочный образец толщилой 130 им) (811

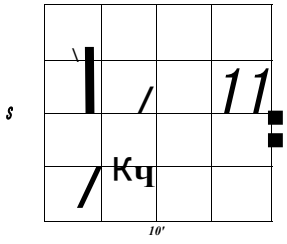


Рис. 22.45. Зависимость холловской подвижности дырок и их концентрации от проводимости пленок CsAu толшиной 270 им с различной степенью окисления [83]

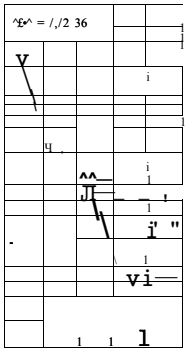


Рис. 22.46. Температурная зависимость сопротивления CssSb [891

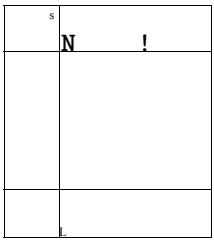


Рис. 22.47. Температурная зависимость подвижности дырок в СигО [90]

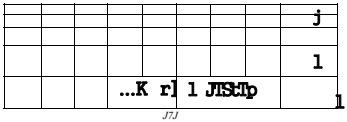
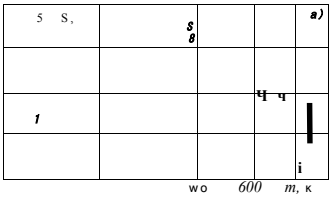
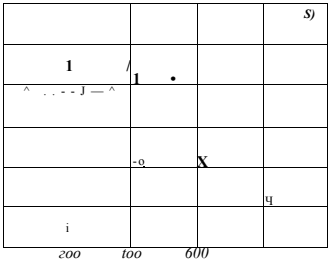


Рис. 22.48. Температурная зависи.мость проводимости CusS |91]: стрелки, обращенные вниз и вверх, — измерения при повышении и понижении температуры соответственно





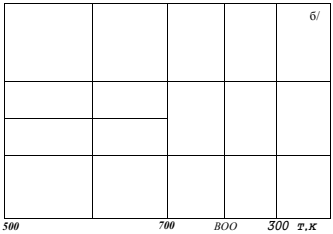


Рис. 22.49. Температурные зависимости электронной проводимости *(а),* коэффициента Холла *(б)* и холловской подвижности дырок *(в)* для различных образцов CuzSe t921:

содержание Se увеличивается от образца / к образцу *9,* соответственно увеличивается концентрация носителей тока (от 1 .9-10"» до 24,5.10-" см-к).

Рис. 22.52. Температурная зависимость проводимости Ag2S [97]: различные точки соответствуют номинально чистым и стехиометрическим образцам (электрохимический контроль отношения Ag/S не проводился); для а-фазы (7'<Го,р) существенно влияние термической предыстории различных образцов

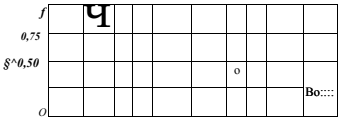


Рис. 22.50. Зависимость эффективной массы дырок Cu;Se от их концентрации (93J

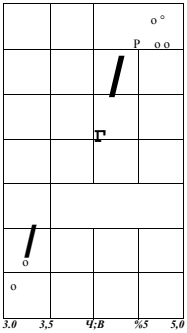
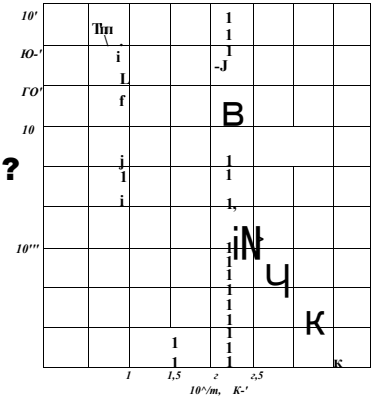


Рис. 22.51. Температурная зави-симость сопротивления AgzO (пленочный образец) [96]



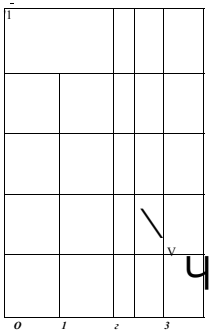


Рис. 22.55. Температурная зависимость проводимости AgsSe [97]. При ?'<7"а,р =406 К зависимость имеет полупроводниковый характер, при *da/dKO*

1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 V?

Рис. 22.53. Температурная зависимость коэффициента Холла в Ag,S 1101]

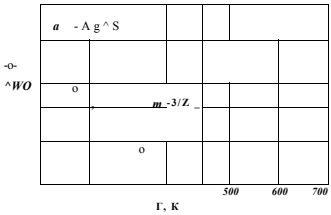


Рис. 22.54. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в а- и р-AgsS [101]

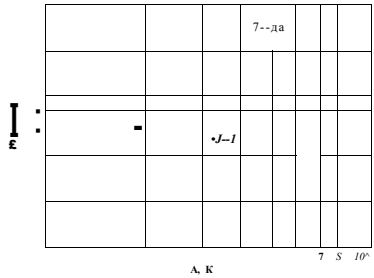


Рис. 22.56. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в Ag2Se [101]

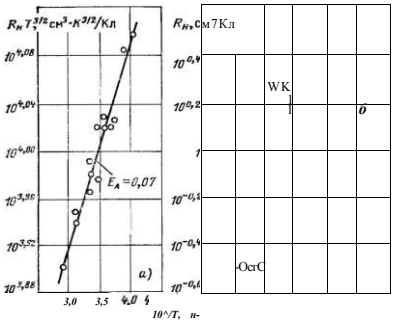


Рис. 22.57. Температурные зависимости коэффициента Холла в различных образцах AgsSe при низких *(а)* и высоких *(б)* температурах [101]

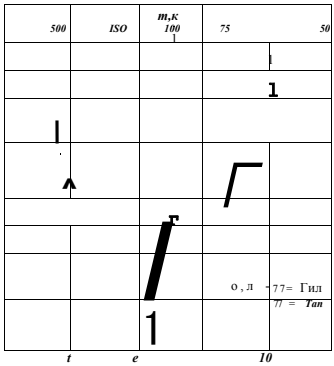


Рис. 22.59. Температурная зависимость коэффициента Холла для различных образцов AgjTe [93]:
—, + — знак ЭДС Холла

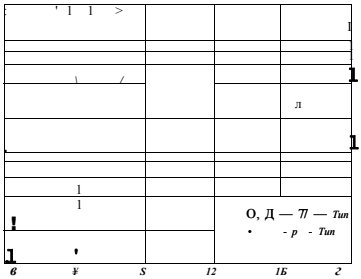


Рис. 22.58. Температурная зависимость удельного сопротивления *n-* и p-Ag2Te [108]:
образцы те же, что на рис. 22.59

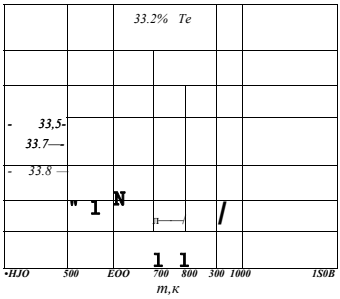


Рис. 22.60. Температурная зависимость подвижности электронов в Ag2Te при разной концентрации Te

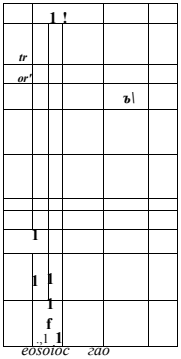


Рис. 22.61. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в AgsTe [123]:

О, Д — массивные кристаллы; • — пленки толщиной 135 им со сферолитической структурой, напыленные на подложку при температуре 120°С

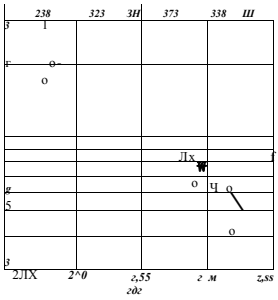


Рис. 22.63. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в AgBr [113]

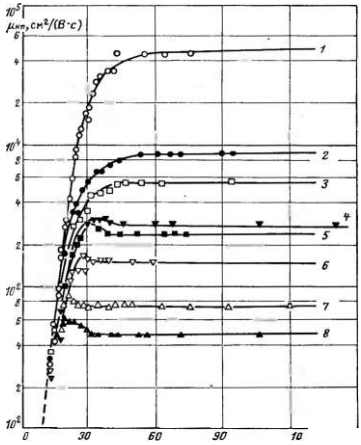


Рис. 22.62. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в чистом и примесных кристаллах AgCI:

/-зонная очистка; 2 — примесь Си; 3—«—примесь Fe, различная обработка [109]

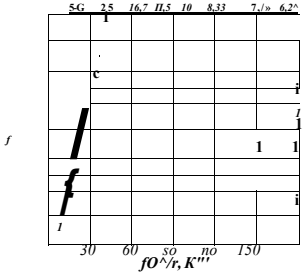


Рис. 22.64. Температурная зависимость подвижности электронов в AgBr:

сплошная линия — расчет с учетом рассеяния электронов на акустических и оптических фононах и примесях [118]

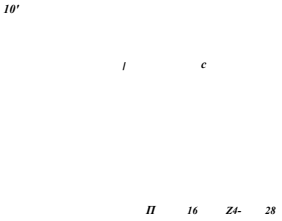


Рис. 22.65. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в AgBr:

t — расчет с использованием измеренной массы полярона; 2 — среднеквадратичная «подгоночная» кривая [120]

22.6. Полупроводниковые соединения A^B^ [293]

	Кристаллическая структура		р, г/см"	К		CMV(B•C)
p-LigSb	Куб., Ol	0,656	3,29 [288]	923 [288]	1,4-1,6 1,25 [16]	
NaSb	Моноклин.,	0,680 (c); 0,634 (6); 1,248 (c); p = 117,6°	4,03 [288]	738 [16]	0,82 [16]	
a-NagSb	Геке., Dlf,	0,536 (o); 0,95 *(c)* Il]	2,67 [123]	ИЗО [123]	1,1 [123]	
KSb	Моноклии.,	0,718 (o); 0,697(b); 1,340 (c); fi= 115,1°	3,52 [288]	878 [16]	0,9 [16]	
a-KgSb	Геке., ***dI***„	0,603 (a): 1,069 *(c)* [1]	2,35 [123]	1085 [123]	1,1 [123]	
P-RbgSb	Куб.,05	0,884		**1006**	1,0 [10J	
CsSb	Орторомб., ***Dt***	0,757 (c); 0,734 (Ь); 1,327 (c)			**0, 8 [10]** 0, 6 [288]	
CSgSb	Куб., Ol	0,914 [1]	4,40 [288]		1,6 [123]	500 [10] (Г-3/2)
P-CSgBi		0,931	4,92 [288]		0,55 [16]	

Таблица 22.7. Полупроводниковые соединения A^B^^ [293]

Соединение	Кристаллическая структура		р. г/см»	^-пл-К		*∂E/∂T,*
	Система, группа	*a, b. c,* нм				
Cu^O	Куб., ***Ol***	0,426 [I]	6,1 [123]	1508 [16]	2,17 (4,2K)	- 2 [10]
«-Cu,S	Ромб., ***СЦ***	1,18 (o); ***2,728 (Ь);*** 1,349 (c)	5,6 [216] 5,8 [288]	**1.393 [288]** **1373 [216]**	1,3	■
a-CUaSe	***Куб.,*** ***Ol***	0,575 [288]	6,8 [216] 7,1 [288]	**1390 [216]** **1398 [288]**	1,25 [94]	■
CuaTe	Геке.,	0,396 (c); 0,612 *(c)*	7,34 [216]	**1173 [216]**	0,5	- 3
Ag^O	Куб., ***Oi***	0,472	6,9	1361	1,2	- 2 0
a-AgaS	Моноклии.	0,423 (c); 0,691 (6);	7,23	1098	1,0 [16] 1,3 (0 K)	- 1 2
P-AgaS	Куб.,	0,488 [288]	7,2 [288] 6,7	859 [288]	-	-
P-AgaSe	То же	0,499	8,25 7,58 [288]	1170 [16]	0,15	
AgTe	Ромб.	0,890 (й); 2,01 ***ф);*** 0,462 *(c)* [288]	7,61 [288]	483 [288]	0,73 [288]	
a-AgaTe	Моиоклин.,	0,818 (a); 0,448 (fc); 0,809 *(c)*	8,41	[216]*	0,67	—0,86 [102]
P-AgaTe	Куб., 0|	0,658	8.5 [216] 7.6 [288]	1228 [216] 963 [288]	0,2	

Соединение	^*D*- К			СМУ(В • с)	см=/(В . С)	Бэ		*n*.. СМ-
	188 300 [288]	0,98	0,58 1,8	0,1 [288] 3,0 [242]	**100 [123]** **5,0**	7,5 [23]		-
a-Cu,Se	235 [288]		0,5		**1400 [288]** **750 [16]**	9 [288]	11,6	
Cuje	220 [288]	0,9 [288]	0,8	200 [40] 400 [288]	**900 [88]** **(г-з.2)**	–	17 [288]	-
Ag20 a.Ag,S	70	**0,7** **4,55 *(та)* [15]**	**1,9** **7,8 *(та)* [15]**	63	18	–	–	3,7-10'5
P-Ag,S	160 [288]	**0,24 [288]**		60-120 Г2881	-	–	–	—
P-Ag5Se	190 [80 К]	0,2	0,54	2000 [16]	520 200 [288]	–	–	3,2-1018
«-Agile	150 (80 К)	0,026-0,034	-	10 000	1000	–	16 [288]	**Z**
P-Ag^Te	12??\288]	0,11	1,5	1100 4000 [16]	18	–	–	-

T < 423 К **переходит** в р-AgjTe [16].

Таблица 22.8. **Полупроводниковые соединения**

						CMV(B•C)				[290]	*D* ' К [290J
CuBr	Куб..	0,568 **[II**	4,72 [121]	750 [290]	2,9 [16] 3,08 [290]	30[16]		**0,28 [290**	**1,4**		163
rCuI	Куб..0		0,604 [290]	6,67 [290]	642 **a r »** (Р-^а) 875 [290]	3,1 [238]		**0,33 [290**			165
AgCl		0,555 [290]	5,56 **[216]**	728 **[216]**	3.0 [242] 4.1 [И]	70 (200 К) 45 ООО [109] (12 К)	40 (200 К) [И]	0,30 [290 0,36 [109;	11,1		161
AgBr		0,577 [IJ	6,47 **[216]**	703 [216]	**2,0 [78]**	240 [10] 4000 1123] 600 ООО [82] (1.7 К)	2 [290] 30 000 (4,2 К)	0,29(291;	12,4		**120**
AgI	Куб.. Т1	0,647 **[1]**	5,67 **[121]**	825 [121]	2,8 [10]	50 [16]					

Таблица 22.9. **Полупроводниковые соединения**

Соединение	Кристаллическая	Г, Г/СМ» [123]	^пл- К ['23]	Eg. эв [293]	*dE^/dT.* Ю-'эВ/К	Гд. К [293]
	0,634	1,95	1375	0,78 (ОК)	—6,4 [131]	450
MgaGe*	0,639 [293]	3,086	1388	0,57 [67]	- 1,8 [67]	363
Mg,Sn*	0,676	3,592	1051	0,23 0,36 (ОК)	—3,5 [293]	240
MgaPb*	0,686 [293]	5,54 [293]	828 [293]	0,15	-	244

продолжение табл. 22.i

Соединение	***m^/m.***		cmV(B - c)	cmV(B - c)	Ю	^oo	СМ» [293]
Alg-zSi	***0,46 (ma)*** [75]	0,87 [10] 2,0 [288]	550 [293]	70 [123]	18,8 [293]	13,3 [293]	10"
	0,18(md) [55]	0,31 [10]	530 Г293] 4335" (77 K)	110 1180 (77 K) [293]	21,7 [293]	13,9 [293]	2-10'^
MgoSn	0,8 ($m_{„}$) [133] 0,3 (m^) [133] 1,17(mrf) [293]	1,28 jlO]	**i-r-')**	260 [123] (7^2.2)	23,75 [219]	15,5 [219]	2,7-101'
J\lg,Pb [293]		0,35 ($от_{„}$) 0,04 ($ОТ_{„}$)	12 000 (4,2K)	14 000			

куб., 0%.

Таблица 22.10. **Полупроводниковые соединения** Л [2 9 3]

Соединение	Кристаллическая структура		р. г/см»	'•пл. к	Е^.эв	***дЕ /дТ,*** **10-Лв/К**
	Система, группа					
MgsAs,	Куб.	1,233	–	1073	2,6	- 9
MggSba	Триг., ***dIJ***	0,454 (c); 0,723(c)[1]	4,09 [123]	1500 [123]	0,82 [151]	–
a-ZngP,	Тетр., ***D***\	0,508 (a): 1.859 (c)	3,54	1258 1313 [288]	2,18 2,0 [288]	- 5 , 5
?-ZnP2	Моноклии., Cgii	0,885 (a); 0,729 (Ь); 0,756 (c)	3,55	1265	1,37	–
2пзР.	Тетр., DJI	0,81 (a); 1,145 (c) [2]	4,54 [16]	1466	1,15 [10]	–
ZnAsj	Моноклин.,	0,921 ***{ah OJ64{b);*** 0,798 (c);	4,94	1041 [133]	0,92 [16]	-
ZngASa	Тетр., D\l	1,178 (a); 2,364 (c)	5,58 [123]	1288	1,0 (OK)	- 4 , 5 5
ZnSb	Орторомб., D^l	0,622(c); 0,774(6); 0,812 (c);	6,38 [117]	819 [117]	0,5; 0,61 (4,2 K) [103]	-
,Ч-гп48Ьз	Мсноклин., ***c***	1,074 (a); 1,22(b); 0,820 (c)	6,81	836	1,2 [16]	–
CdP4	Моноклии.,	0,527 (a)^ 0,519 (Ь); 0,766 (c);	2,04 3,90 [288]	–	1,0 [111]	- (2 , 7 - 3 . 7)
?-CdP2	Тетр., D'S	0,529 (c): 1,974 (c)	4,19	1057	2,02	- 8 , 6
CdsP^	Тетрагон.,	1,256 (a); 2,544 (c)	5,60 [123]	**970 [123]** **1015 (288]**	0,55 [Б4|	- 1 , 8
CdAsa	Тетрагон.,	0,795 (c); 0,468 (c)	5!M [288]	**894 [133]**	1,13 [16] 1,0 [15]	-
a-CdgAsa	Тетрагон., ***cII***	1,265 (c); 2,544 (c)	6,25 [123]	994 [133]	0,12 (OK)	—3,3
CdSb	Орторомб., d'**I**	**0,647 (c); 0,824(6); 0,853 (c) [117]**	6,92 [117]	729 [133]	0,56 [117]	- 5 , 4 [117]
?-Cd4Sb3	Моноклин., D^	**0,815 (a); 0,816 (&); 1,196(t^**	-	703	1,25 [16]	- 5 , 4 [2881 - 3 , 6

смуф-с)

MgsAs,				10-20		
		3,1 (ma)			100 (~r-3-2)iio]	
пР,	465 [288]			1800		
				3,5	20 [288]	
					1000 (77 K) [288]	
ZnsPj*^	320				100 [288]	
	369 (160 K)				**20**	
ZnAs»	234	0.35 [288]	2,45 [288]	500	**100**	**12—15**
	284 (55 K)					
ZnsAso	290	1,7 [16]	0,65 [16]	10 • (Г/300)-'-' [135]	**17 (^R-1-64) [16]**	11,8
ZnSb*3	275(120K) 225 (80 K) [117]	0,175 (/n„) [117] 0,146(m^)	0,53 [18]	800 (100 K)	**700(~7'-3/2) JSQJ**	
?-Zn4Sb3		0,16 [288]	**0,12**	330 150 [111]	**980 [16] 600 [288J**	
P-CdPa						
«зРа*^	251 235 (55 K)	0,09 [77]	0,5	3000 (T~^•^) [54] 5-104(4,2K)		37
CdAs2*§	233 (55 K)	0,15 (m„)[133] 0,58 (mj^) 0,37 (ma)	0,094 (m„) [133] 0,346 (mj) 0,22 (ma)	100-400 [133]	400 [133]	**15,4—17,**

Соединение	Го. **К**	**ТУТ.**	***rriplm^***	***V-n-*** СМУ(В • *с,*	***см'/(в*** • С)		
a-CdgAsa®	**258 [288]**	0,046 (та); ^„=**174-30,2 [52]**	**0.12**	**2,6 • 10«;** 2,8-10« (4,2 K)	**430 [16]**	**42**	**16**
CdSb	**180 (80** K) **[117]**	**0,72**	**0,34-0,4 1,07**	**660**	**2000 [117]**	**16,4**	
p-Cd^Sbg		**0,1-0.2 [288]**	**0.35 [288]**	**1000 [288]**	ПО **900 [288]**		

1 Анизотропия сопротивления р ; р^ : р = 5 : ' = 3.56 - 10" СМ-?.
' п; = 10» см-».

^оо = И Т
^00 = 11.5
^со = 16.

Таблица 22.11. Параметры валентной зоны соединений типа Д' [138,

Соединение			**эВ**	**Ег. эВ**	Соединение			**эВ**	**эВ**
	Сфалерит					***Вюрцит***			
ZnS	**0,06-0,07**				ZnO			**0,007 [159]**	**0,052 [159]**
ZnSe	**0,43**				ZnS	**0,092**	**0,055**	**0,029**	**0,117**
ZnTe	**0,9—0,96**				CdS	**0,065**	**0,027**	**0,015**	**0,025**
CdTe	**0,8—0,9**				CdSe	**0,42**	**0,041**	**0,078**	**0,433**
S g	**0,40-0,45 0,94-1,1**	–							

Таблица 22.12. Полупроводниковые соединения

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа		р, г/см»	^пл- К		$\partial E_g/\partial T$, 10-" эВ/К
ZnO	Геке.,	Вюрцит*!, 0,325 (а); 0,591 (с) [290]	5,60 [121] 5,66 [123]	2248 [123]	3,35 [144] 3,43 [66]	- 8 [144]
ZnS	Куб., Г|	Сфалерит*^, 0,541 (а)[138]	4,10 [140]	2103 [236]	**3,54*3 [123]** **3,6 [114]** **3,67(ш) [138]** **3,91 (ш) [123]**	-5,3*3 [1141 - 3 , 8 (и)}
ZnSe	То же	Сфалерит, 0,5668 (а) [138]	5,42 [121]	1788 [123]	**2.7 [114]** **2.8 [138]**	- 4 , 5 [289J
ZnTe	**» »**	Сфалерит, 0,6104 (а) [138]	5,68 [141]	1512 [123]	**2,1 [47]** **2,34 [142]**	- 4 , 1 [289J - 5 [290]
CdO	Куб.,	0,470 [1]	8.15 [216]	1099 [288]	2,3 [123] 2,68 [59]	- 6 [59]
CdS	Геке., С|„	Вюрцит*!, 0,4136 (а); 0,6713 ***(с)*** [138]	4,82 [139]	2023 [123]	2,52*3 [142] 2,4 (S) [214]	- 4 , 4 [1381
CdSe	То же	Вюрцит*!, 0,430 ***(а);*** 0,701 (с) [138]	5,81 [139]	1531 [123]		-4,6[144J
CdTe	Куб., 7-2	Сфалерит, 0,648 (с) [138]	5,86 [139] 6,20 [121]	1371 [123]	1.5 [237] 1.6 (77 К)	- 3 , 0 [68] - 5 , 6 [288|
cHgS	Триг., ***Dl***	0,414 (а); 0,949 (с) [288]	8,09 [288]	618 [288]	2,1 [290]	–
P-Hgs	Куб.,	0,585 (с) [290]	7,73 [290]	1098 [288]	0,15 [289]	–
HgSe	То же	0,608 (е) [138]	8,26 [139]	1071 [123]	0,2 [148]; 0,22 [156]:	5 [289]
HgTe	**» »**	0,646 (с) [138]	8,09 [289]	943 [123]	0,115 [33] 0,250 (77 К) [33]; 0,302 (4,2 К) [38]	7 [289]

Гд. к

ZnO	-1,94 [155J	-(1,24-1,74) [155]	416 [141]	0,0732 [254] 0,605 [220]	0,0512 [254 0,0545 [220	8,5 [159]	1,0 [159]
ZnS	1И (И) 2,3 (i c) [138]	1,04 [148]	310 [140]	0,044 [138]	0,0367 [138 0,0394 (ю)	8,54 [289] 8,32 [138]	5,2 [289] 5,13 [138]
ZnSe	1,46 [148]	5,25 [148]	400 (80 К) [144]	0,031 [138]	0,0263 [138]	9,1 [138]	
ZnTe	1,14-1,37 [289 -0,38 [289] -0,57	0,9-1,1	250 (80 К) [114]	0,026 [138]	0,024 [138] 0,0219 [254]	9,73 [289] 10.1 [138] 9,67 [142]	**7,28** **8,26**
CdO	1,81 [201]		415 [288]	0,0654 [254]	0.0325 [254]	21,9 [254]	5,4 5,3
CdS	1,78 (II с) [138] 1,72(1с)	1,15(|с)[138] **1,00 I**	250-300 [114]	0,038 [138]	0,0324 0,0301	9.3 [138 8,5 [289	5,2
CdSe	0,6 (Iie) [138]			0,027 [138]	0,0263	9.4 [138	5,98
CdTe	0,51 (Lc) -1,1 [202]		(80 К) [114] 200	0,0212 [138]	0,0172 [254 0,0173 [138	9,63 [138] 10,6 [138] 10,29 [289]	**6,10** 142]
a-HgS						11,0 [161]	7,19 [2
P-HgS					**0, 022 [2**	18.2 [290]	11,3 [2891
HgSe	—14 | 289 -36 | 157		242 [114]		0,015 [2	25,6 [114]	7,2 [289]
HgTe	—22 | 289 —25 | 157		143 [288]	0,0171 [252]	0,0146 [252]	21 [252]	14 [138]

Соединение	*∂Ё /∂P* 10-* эВ/Па (10-'эВ/ат)	*m^/mo*	*m /mo*	CMV(B'. C)	CMV(B • C)
ZnO	0,6-1,9 [10]	0,27 [123]	0,59 (^1, V,) [280] 0,31-0,55 (tig)	180 IOOC	-
ZnS	5,6*S[114] 9 и	0,34-0,39 [289] 0,27 [138]	*ma/m„ = 0,6 /Ш* 1,4 (II c, ьу)*Ч289] 0,49 (±c, ьу)	140 1)1' 200 [16]	**5 (700 K) [138]**
ZnSe	6 1114]	0,15-0,17 [114]	0,6 [138]	260 (300-550 K)	15 (200-400 K)
		0,18 [142]	0,75 [289]	530 [114. 138] 6000 (55 K) [153]	**23 [154]**
ZnTe	6(114)	0,12 [289]	0,65 [181] 0,15*' [229]	350 (coГ-з/2) [114] 340 **138]**	100(coГ-3/2) [16] ПО [138]
CdO	–	0,1 [143] 0,3	—	120 500	
CdS	3.3 [123]	0,18—0,20 **0,18 (s)*3 [289]**	5,0 (1! c) [138] 0,7 (±c) **[21]**	350 64000 • Г-з/2 [138] (50-200 K)*= 20 (roГ-3/2) [114]	15 [138] **50 [46]**
CdSe	**4 [290]**	0,11-0,13 [289] 0,10-0,12 (s)*3	> 7 (Ll c, *v^* [138] 0,45 (±c, vi) [138] 0,9 (±c, *v^)* [22] *ma/mo* = 0,63 (til) [138]	580 650 138]	50 [114]
CdTe	3,0 [218] 7,9 [290]	0,10—0,12 [289]	0,1" [289] 0,4*8	1200 [1211 3000 (77 K) [121] 57 000 (30 K) [149]	80 (coГ-з/2) [1J4J 50 [121]
«-HgS	–	–	–	45 (II *c)* [289] 13 (.1C)	–
P-Hgs		0,028 [289]		10 000 (77 K) [289] 100 000 (4,2 K)	—
HgSe	5 [289]	0,050 [156]	0,17 [84] 0,55 [112]	20 OOO [289]	
HgTe	**10 [84]**	0,017 **0,03 (4,2 K) [84]**	0,16 **0,35 (4,2 K) [84]**	33000 100 000 (77 K) [289] 900 000 (4,2 K)	—

Соединение	[138]	Чгъ [138]	-coll [138]	^oo33 [138]
ZnO	7,8 (±c) [290]	8,75 (II C) [290]	3,y±c) [290]	3,75 (II C) [290]
ZnS				
ZnSe			5^9	
ZnTe			7,28	
CdO				
CdS	9,02	9,53	5,17	^2 3
CdSe	10,2	9,33	5,96	6,05
CdTe			7,21	
«-HgS	18,2 [290]	23,5 [290]	6,25 [290]	7,9 [290]
P-HgS				
HgSe				
HgTe	-		-	-

Может кристаллизоваться в структуре типа сфалерита.
Может кристаллизоваться в структуре типа вюрцита.
Знаками **S, *w*** помечены данные, относящиеся к модификациям типа сфалерита и вюрцита. Непотеченные данные относятся л основной модификации.
Тяжелые дырки.
Значение, усредненное по кристаллографическим направлениям.
** Легкие дырки.
Масса легких дырок.
Масса тяжелых дырой.

Таблица 22.13. Полупроводниковые соединения g [293]

Соедашение	Кристаллическая структура		р, г/см^	^пл- К		∂E^/∂T, 10-* эВ/К	
	Система, группа	a, b, c, нм					
P-Hgl.	Орторомб., СЦ	0,467 (а): 1,376(6): 0,732 (с) [1]	6,09	532	2,39	-(7-14)	0,25 (т„) 0,29 (nt J
CdFa	Куб., 0 |	0,539 [1]			6,05 [26]		0,4 [26]
Cdls	Геке.	0,424 (а); 0,683 (с)	5,67	660	3,47	-12	

Соединение	mp/m„	CMV(B • с)	HP, CMV(B • с)	Ч	E.
p-Hgl,	1,72(^1,) 0,56 (m^)	100		8,5—25,9 (анизотропна)	5,1-6,8 (анизотропна)
CdFs		19 [26]	-		
Cdl2				5,9-12,9 (анизотропна)	4,3—4,6 (анизотропна)

центре зоны Бриллюэна (при к=0). Вблизи него поверхность постоянной энергии близка к эллипсоиду вращения с большой осью, направленной вдоль оси ***a.*** Экстремум валентной зоны расположен в точке к=^0. Обзор свойств соединений типа см. в [241].

Все соединения типа Л^В^т являются фазами переменного состава. Полиморфизм и политипизм, свойственные многим из них, приводят к сильной зависимости структурно чурствительных свойств от условий выращивания кристалла и термической обработки.

Наиболее изученные полупроводники кристаллизуются в решетках типа сфалерита Т^ или вюрцита С* и имеют прямую зонную структуру (экстремумы зоны проводимости и валентной расположены в точке к=0) Кристаллы кубической структуры (сфалерит) изотропны; одна из подзон их валентной зоны отщеплена за счет спин-орбитального взаимодействия Asc (см. рис. 22.97). Кристаллы гексагональной структуры (вюрцит) слабо анизотропны (этой анизотропией часто пренебрегают); наличие дополнительного взаимодействия Acr (кристаллическое поле некубического кристалла) приводит к расщеплению валентной зоны на три подзоны (см. рис 22.98). Экспериментально определяемые оптическими методами расщепления ***El*** и Еа связаны с ***Asc*** и ***Acr*** соотношениями [138]

Em- + + — A™ + A.. -

HgS, HgSe и HgTe имеют сложную зонную структуру с перекрывающимися зонами (см. рис. 22.99). Перекрытие порядка £(^0,001 эВ [199, 200] (по другим данным Е,=0,02 эВ (HgTe); 0,07 эВ (HgSe) [138]).

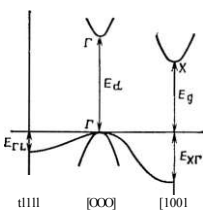
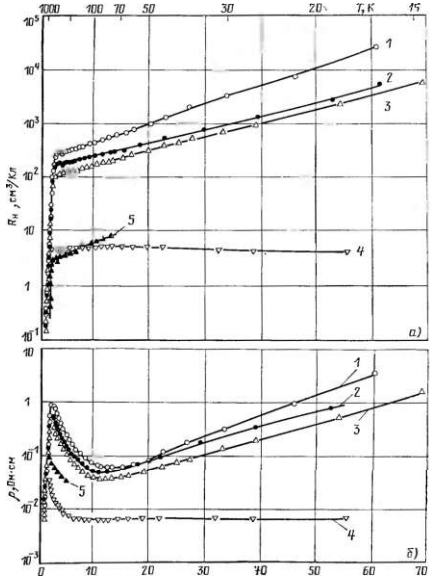
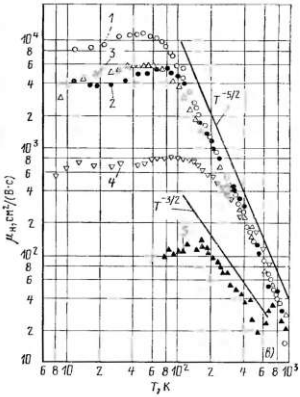


Рис. 22.66. Зонная структура Mg2Si, Mg^Ge, MgsSn [123, 129, 130, 293]

tlll] [OOO] [1001





Рис, 22.67. Температурные зависимости коэффициента Холла *(а)*, удельного сопротивления *(б)* и холловской подвижности электронов и дырок *(в)* в образцах Mg2Si n-типа *(1—4)* и р-типа *(5)* [134]. Концентрация носителей n=2,8-10i®-1,7-10>8 см-з (увеличивается *от 1 к 4)* и *р*= =2,2-10'® CM-S соответственно

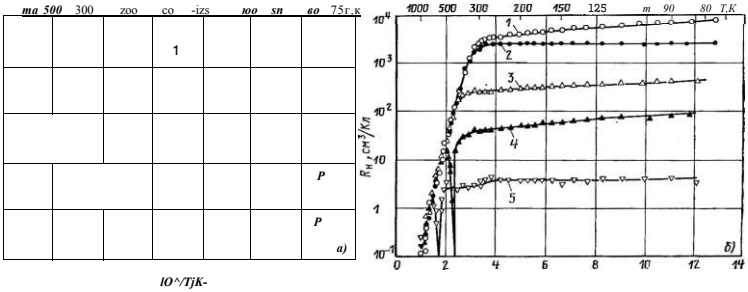
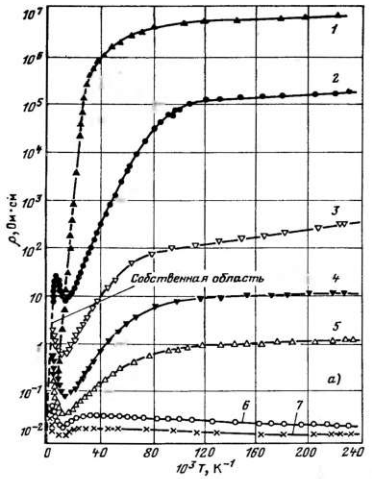
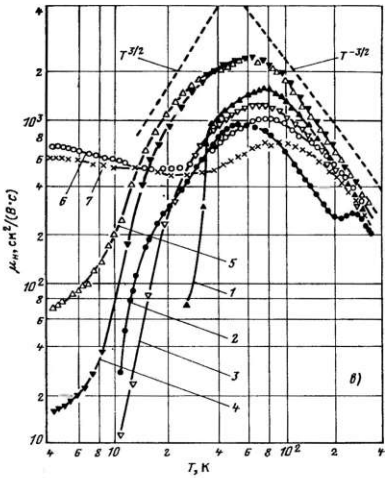


Рис. 22.68. Температурные зависимости удельного гивления fa) и коэффициента Холла *(б) в п-* и р-MgsGe [135]:

•1—5 — образцы с различной концентрацией носителей, возрастающей от / к 5





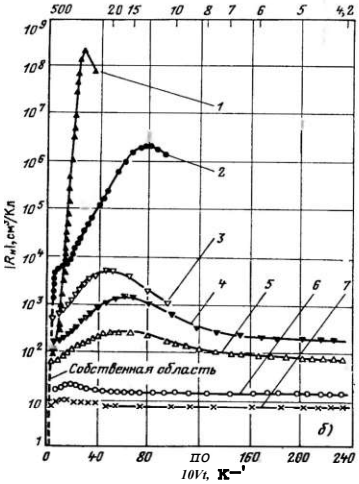


Рис **22.69.** Температурные зависимости удельного сопротивления (и), коэффициента Холла (б) и холловской подвижности электронов *(6)* в различных образцах n-Mg2Ge с концентрацией носителей, меняющейся от **1,3-10'«** до **8,2-10"** см-з *(1—7}*

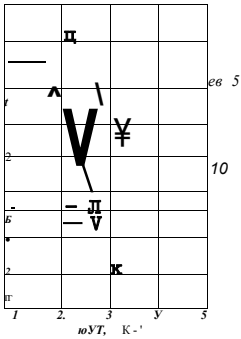


Рис. 22.70. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в Mg2Sn, определенная из данных по отражению на свободных носителях (О) и электропроводности (ф) [147]

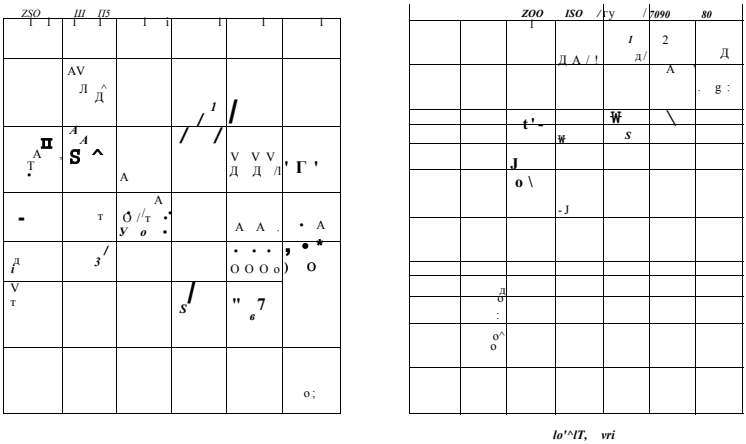
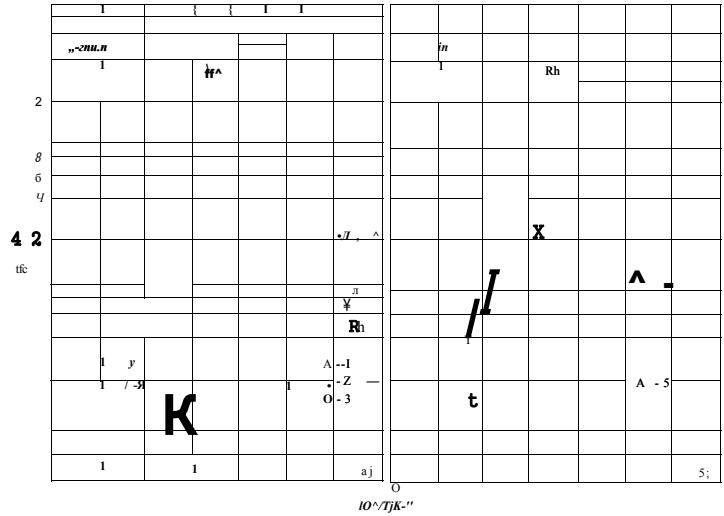


Рис. 22.71. Температурные зависимости удельного сопротивления *(в) и* коэффициента Холла *(б)* для различных образцов n-MgjSn с концентрацией носителей, меняющейся от 3-10'® до 6-10'® см-^ (1—в) в области смешанной проводимости [1371



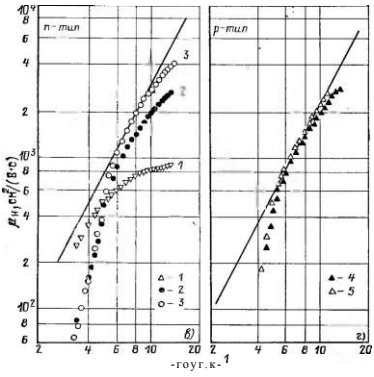
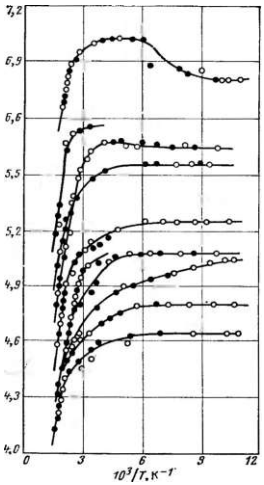


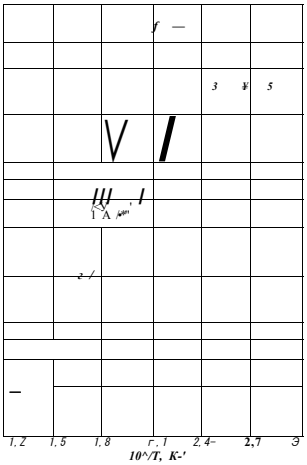
Рис 22.72. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла «-MgsSn *(а),* p-MgsSn *(б),* а также холловской подвижности электронов *(в)* и дырок *(г)* в различных образцах *п-* и р-типа [146]: концентрация носителей см-: У-9-1О; («J: 2 - 1.5-10" (n); 3—1,3-10'® (n); 4—4,3-10 8 (p); 5-3-10"' (pj



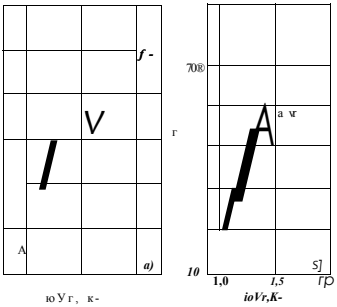
Vwn 22.73. Температурная зависимость удельного сопротивления MgzPb для образцов р- типа [1581

1n(10® р), Ом см

в — измерения при возрастании температуры образца:
О — измерения при уменьшении температуры образца



5. Температурная зависимость сопротивления гпзР2 в собственной области [163]:
концентрация носителей возрастает от У к 6



ю У г, к-

Рис. 22.74. Температурная зависимость сопротивления (*а*) и коэффициента Холла (*б*) различных поликристаллических образцов Mg3As2 [1601

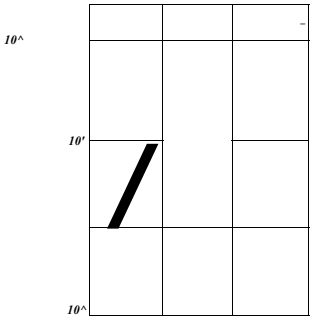


Рис. 22.76. Температурная зависимость удельного сопротивления р, коэффициента Холла Ян и подвижности дырок Ив в гпзР2[165]

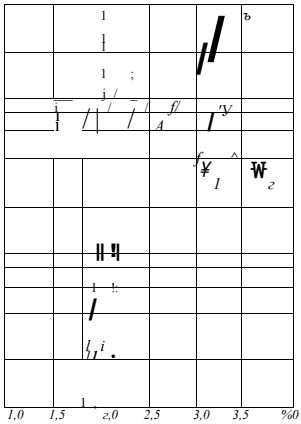


Рис. 22.77. Температурная зависимость коэффициента Холла в P-ZnP2 [166]:
1 — кристаллы, полученные из паровой фазы; 2 — кристаллы, полученные из жидкой фазы

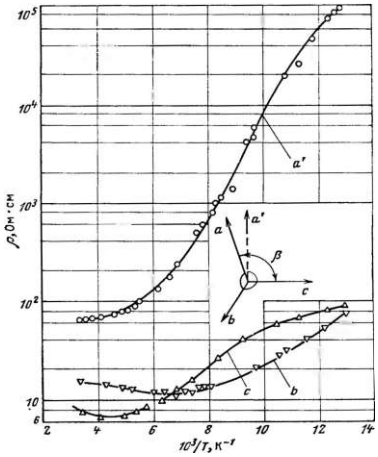


Рис. 22.78. Температурная зависимость удельного сопротивления для трех вырезанных из одного монокристалла образцов ZnAsj [167]:
ориентация образцов показана на вставке, направления Ь и с соответствуют кристаллическим осям, направление *а'* перпендикулярно Ь и с и составляет угол 12° с моноклинной осью а

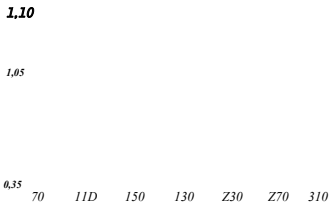


Рис. 22.79. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны в гпзАбг [176]

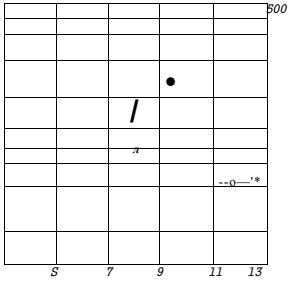


Рис. 22.80. Температурные зависимости коэффициента Холла и подвижности дырок в гпзАвг [177]:
др! О — нелегированный образец; Л — легирован Си; # — легирован Те

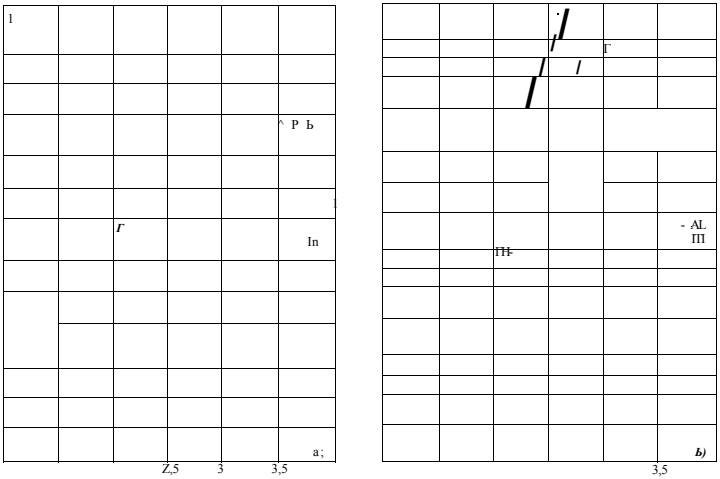


Рис. 22.81. Температурные зависимости удельного сопротивления *(а)* и коэффициента Холла *(б)* в ZHSASJ [179]: на ряде кривых указа.чы легирующие элементы, остальные кривые относятся к чистому материалу; кривая без экспериментальных точек — коэффициент Холла в собственном материале [179]

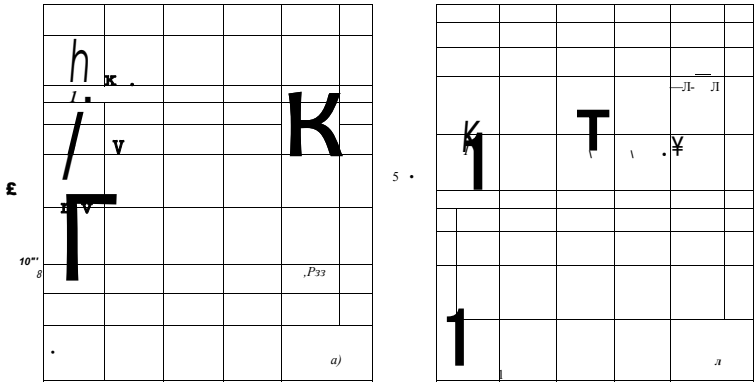
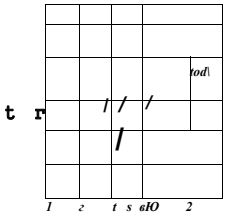


Рис. 22.82. Температурные зависимости компонент тензора удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла *(б)* в ZnSb [180]



22.83. Температурная зависимость холловской подвижности дырок для трех главных направлений в ZnSb [182]

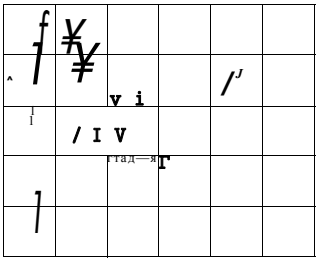


Рис. 22.85. Температурные зависимости удельного сопротивления *(1, 2)* и коэффициента Холла *(3)* в CdPi [I "" J — монокристалл: **2, S —** поликристаллы

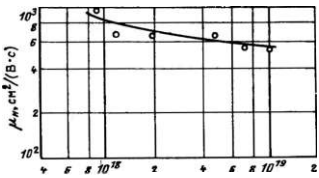


Рис. 22.84. Зависимость холловской подвижности дырок от их концентрации при Г=300 **к** в Zn4Sb3 **[187]**

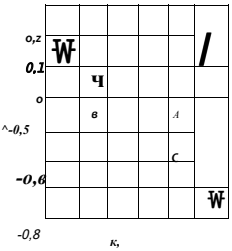


Рис. 22.86. Структура энергетических зон в С(1зр2 [192] (£g=0,53 эВ, Aso=0,l эВ, P=6,7-10-® эВ-см, m„i= =0,5 Шо) [192]:

А, в, с — разрешенные прямые межзонные переходы; *Vu Va* — валентные зоны; *с* — зона проводимости

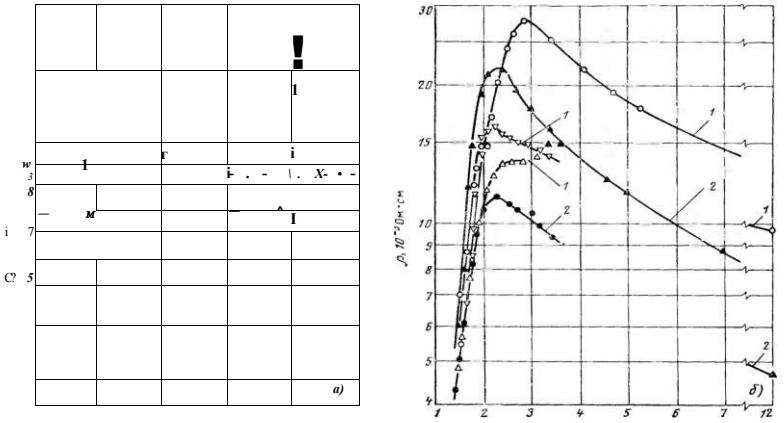


Рис. 22.87. Температурные зависимости коэффициента Холла *(а)* и удельного сопротивления *(б)* в монокристаллических (/) и полшсристаллических *(2)* образцах СёзРг [190]

5 <

ч.

Рис. 22.88. Зависимость подвижности электронов при Г=77 К от их концентрации в Cd3P2 [191]:
сплошная линия — расчет; точки — разные экспериментальные

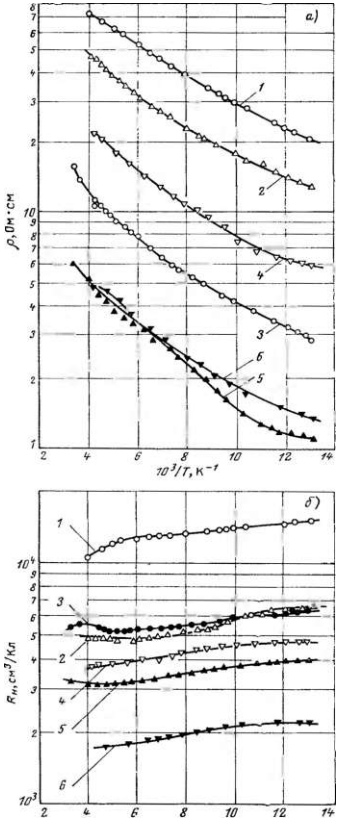


Рис. 22.89. Температурные зависимости удельного сопротивления *(а)* и коэффициента Холла *(б)* для монокристаллических образцов rt-CdAs2 [195]:
концентрация носителей возрастает *от 1 к 6*

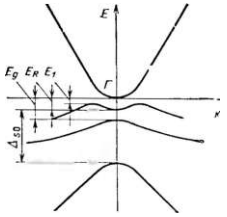


Рис. 22.90. Структура энергетических зон в СдзАвг [293]:
£g=0,12+3,3-10-' *Т* эВ; £д=0,03эВ (10 К); £/?=0,05 эВ (4,2 К); £>=0.026 эВ (10 К); A^O = 0.21-^0.31 эВ

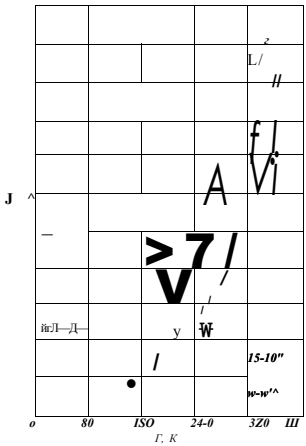


Рис. 22.91. Температурная зависимость концентрации электронов в различных кристаллах CcЗзАзг [196]:
пунктирная линия соответствует собственной концентрации

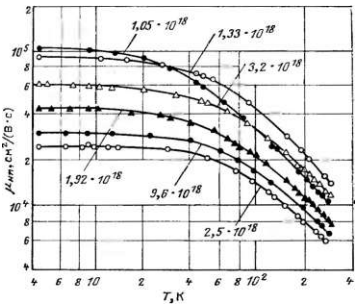


Рис. 22.92. Температурная аависимость холловской подвижности электронов в C(ЗзA52 [187]

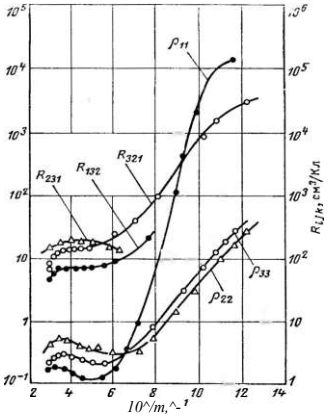


Рис. 22.94. Температурные зависимости компонент тензора удельного сопротивления и коэффициента Холла в n-CdSb, легированном Ga [205]

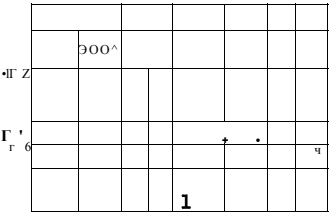


Рис. 22.93. Зависимость подвижности электронов от их концентрации в СдзАзг при 7"=4,2 К по данным различных авторов [204]:
линии — расчет

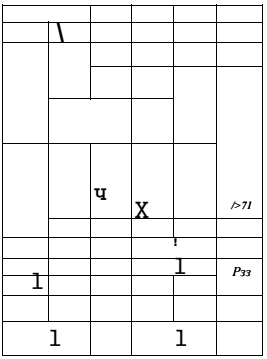


Рис. 22.95. Температурная зависимость компонент тензора удельного сопротивления и коэффициента Холла в j9-CdSb [205]

Рис. 22.96. Зависимость холловской подвижности дырок от их концентрации в CdiSbs [187]

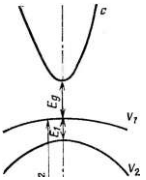


Рис. 22.98. Зонная структура полупроводников AIIIBVI (вюрцит) [138]



Рис. 22.97. Зонная структура полупооводников типа (сфалерит) [138]

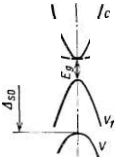
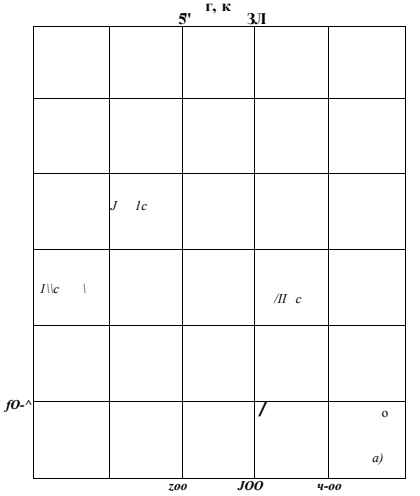
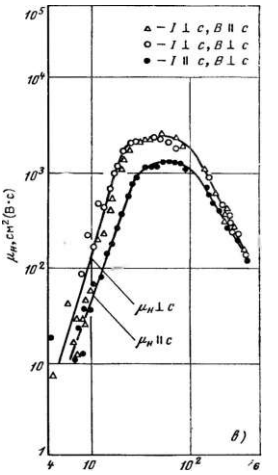


Рис. 22.99. Зонная структура p-H^ HgSe и HgTe [13 199, 200]





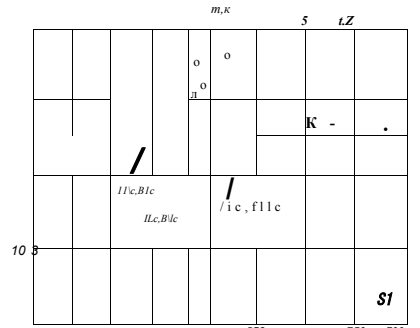


Рис. 22.100. Температурные зависимости проводимости (а), коэффициента Холла (б) и холлозсч-ой подвижности электронов (в) в ZnO при различных ориентациях тока / и магнитного поля В относительно оси с [207]

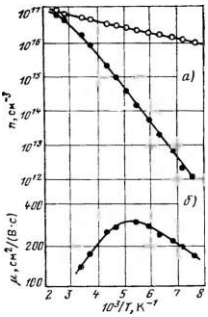


Рис. 22.101. Температурные зависвмости концентрации электронов (а) и их холловской подвижности (б) в ZnS [1381: ф — гексагональный Zno, легированный Al и отожженный при 1050 К; О — кубический ZnS, легированный I и отожженный при 950 К

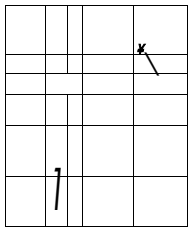


Рис. 22.103. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в ZnSe [208]

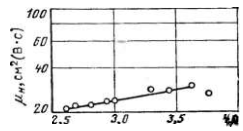
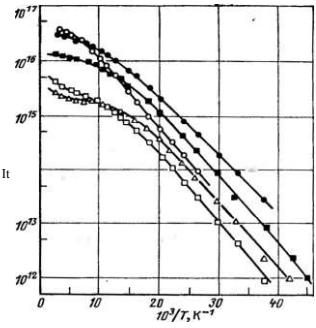


РИС. 22.104. Температурная зависимость холловской подвижности **в** ZnSe **[210J**



It

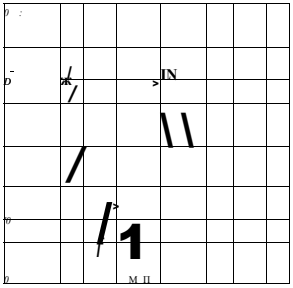


Рис. 22.102. Температурные зависимости концентрации электронов *(а)* и их холловской подвижности *(б)* в кристаллах n-ZnSe **с** различной концентрацией доноров и акцепторов [138]:
N^. N^. 10б см-': л -0,34 CV^). 0.13 (W^): И-1,8 (Wp). 0,5 *(N);* П-1,06 (Wq), 0,75 « -3,7 0.5 (W,); О -7.4 (Wc), 3,4 (W^.

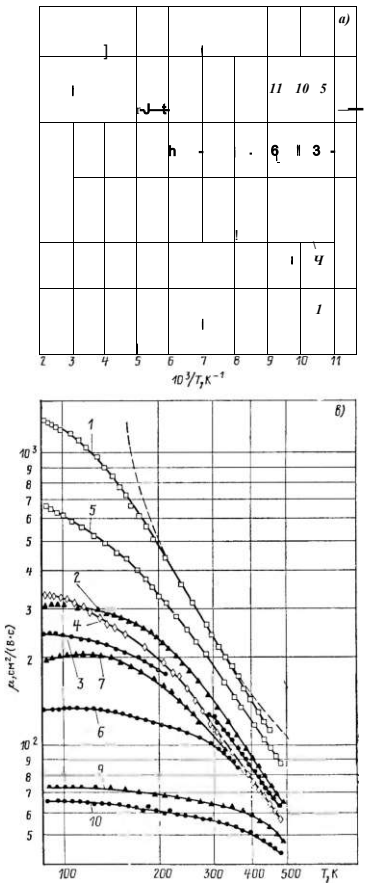


Рис 22 105 Температурные зависимости проводимости *(а):* коэффициента Холла *(б)* и подвижьости дырок (е) в кристаллах p-ZnTe 1235J.

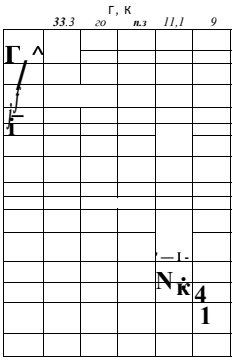


Рис. 22.106. Температурные зависимости коэффициента Холла (О) и холловской подвижности электронов (#) в нелегярованном кристалле CdS [213]

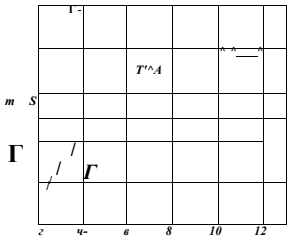


Рис. 22.107. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в различных кристаллах CdS [215]

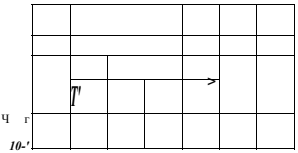


Рис. 22.108. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в разных образцах CdS [217]

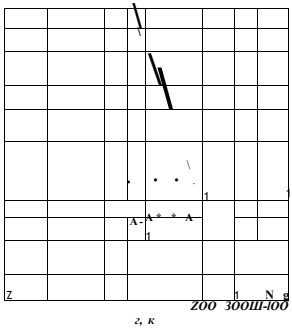


Рис. 22.109. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в CdSe [138]: концентрация доноров Ga. 1-10'® (нелегированный образец); • -1,4-10"; ф- '9-10'®; кривая — расчет

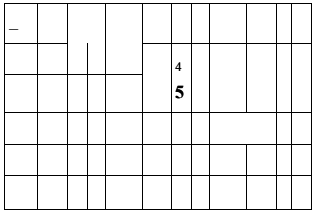


Рис. 22.110. Зависимость холловской подвижности электронов в CdSe при Г=77 К от их концентрации: пунктир — расчет [218]

Рис.22. 112. Температурные зависимости холловской" подвижности электронов в n-CaTe [138]. Обозначения см. в подписи к рис. 22.111; сплошная и пунктирная линии—расчет по разным моделям

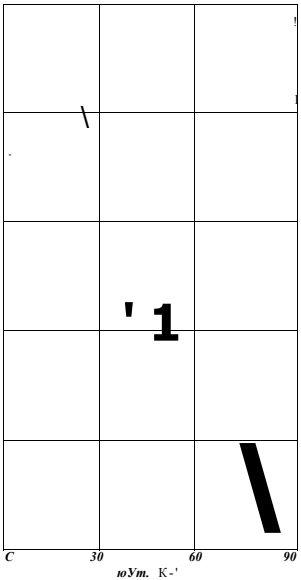
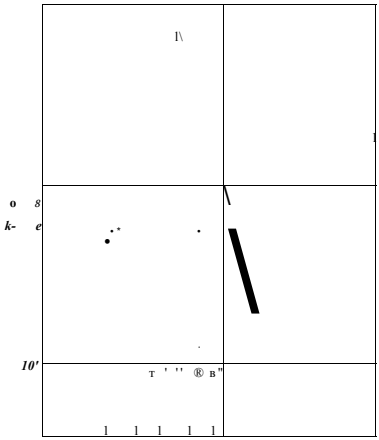


Рис. 22.111. Температурная зависимость концентрации электронов в n-CdTe [138]:
+, О, X, П, Д ~ нелегированные образцы, прошедшие зонную очистку; О — отжиг в избытке Cd



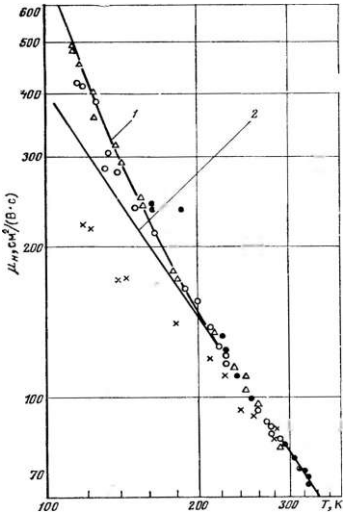


Рис. 22.113. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в p-CdTe [138]:
™ формулам: |i=57 exp |(252/Г)-1) и X7–3/2; упельное сопротивление образцов при 7--293 К, Ом-см: Щ 2.2-1ff; О—1.5-Ш''; X —1,9.10^; Л — 2,1 • 10^

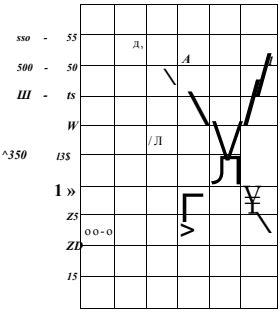


Рис. 22.114. Температурные зависимости удельного сопротивления, подвижности электронов и их **концен-**трации в пленке p-HgS толщиной 11,5 мкм [222j

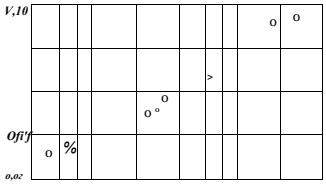


Рис. 22.116. Зависимость эффективной массы электронов в HgSe при Г=300 К от их концентрации [224]

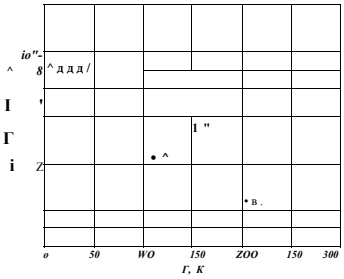


Рис. 22.117. Температурная зависимость подвижности электронов в HgSe [227]. Кристалл подвергался последовательным процессам отжига для получения различных электронных концентраций n, см-^ при ***Г=4,2*** К:
Д-1,89-10"; О - 3.78 • 10"; ® - 3.92 • 10"

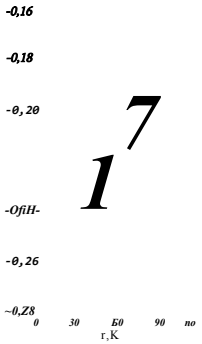


Рис. 22.115. Температурная зависимость ширины запре- щенной зоны в HgSe [223]

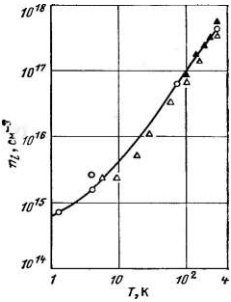


Рис. 22.118. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в HgTe:
линия — расчет (243); точки — данные разных авторов

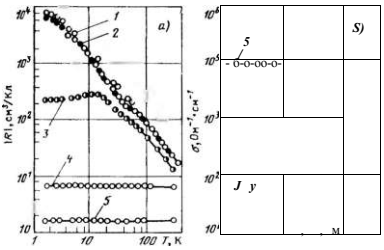


Рис. 22.119. Температурные зависимости коэффициента Холла (а) и проводимости (б) в HgTe [239]:
концентрация носителей возрастает от образца *1* к образцу *5*

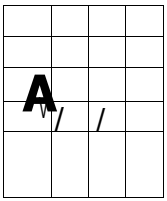
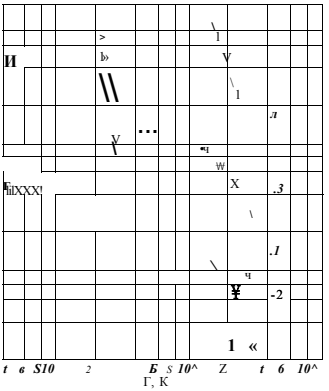
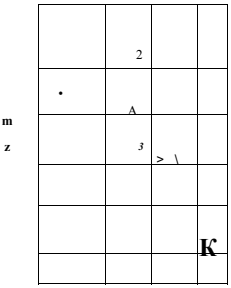


Рис 22.120. Зависимость подвижности электронов в HgTe при Г=4,2 К от их концентрации. Расчет без учета (пунктирная кривая /) и с учетом (сплошная кривая 2) экранирования заряженных центров за счет межзонных переходов [240]



Г, К



Г, К

Рис. 22.122, Температурная зависимость холловской подвижности дырок в HgTe в области собственной проводимости. Расчет с учетом рассеяния дырок на акустических и неполярных оптических фононах (/), неполярных оптических фононах *{2)* и суммарного рассеяния (5) [245]:
точки – данные разных

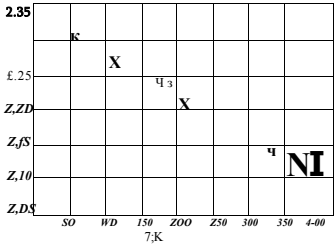


Рис. 22.123. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны Hgia [9]:
Щ данные по пропусканию; О – данные по отражению

Рис. 22.121. Температурная зависимость подвижности электронов в HgTe. Расчет с учетом рассеяния электронов на заряженных центрах (/), полярных оптических *(2),* неполярных оптических (5) и акустических *{4)* фононах [244]:
точки – данные разных авторов

22.3.3. Соединения типа Л^'В'^—4niBvii

Полупроводники типа /^"IBV характеризуются высокой подвижностью и малой эффективной массой электронов. Эти свойства обеспечивают им широкое применение. Изучены весьма подробно. Кристаллизуются в структуру типа сфалерита Г^. Зоны проводимости имеют, как правило, несколько минимумов, расположенных в точке к=0 и на осях [111] и [100].

В GaN, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb абсолютный минимум г расположен в центре зоны Бриллюэна (к=0) (см. рис. 22.126), абсолютный минимум Д — на оси [100] в BP, A1P, AlAs, AlSb (см. рис. 22.127). Числовые значения параметров зонной структуры см. в табл. 22.15.

Валентная зона вырождена при к=0. Максимум зоны легких дырок Уг находится в точке к=0; максимумы зоны тяжелых дырок Vj расположены несколько выше (на 0,01—0,001 эВ) и лежат на осях [111]. Имеется также зона Vs, отщепленная за счет спин-орбитального взаимодействия Aso.

Полупроводниковые соединения П1 и VI групп обладают стехиометрическим составом двух типов: и и имеют много кристаллических модификаций.

Соединения ЛЧ^Й"^! делятся в основном на два класса: 1) с гексагональной структурой D^ (GaS, GaSe, InSe), 2) с тетрагональной структурой D]^ (InTe, US, TlSe, TlTe). Большинство кристаллов имеет сложную структуру.

Соединения л'^В'^ имеют малую подвижность носителей (следствие дефектной структуры [150]) и обладают, как правило, проводимостью п-типа (за счет избыточного числа атомов халькогена). Эти соединения малочувствительны к легированию другими примесными атомами. Многие из этих соединений кристаллизуются в структуры нескольких типов.

О полупроводниковых свойствах халькогенидов редкоземельных элементов — см. [62]. Полупроводниковыми свойствами обладает соединение UO2, кристаллизующееся в кубической структуре of с a=0,546 нм [1], £g=1,3 эВ [87], цр=10 см7(В-с) [249].

10'

г, к

Рис. 22.124. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в Hgb [104]: О – i'J.c; остальные символы – *БП с,* образцы различной толщины

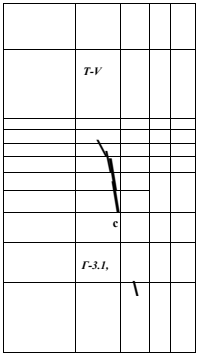


Рис. 22.125. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в Hgia [1101: 0--E_Le:

Таблица 22.14. Электрофизические свойства карбида бора B4C

Кристаллическая структура		Р. г/см=	^пл. К	Я^, ЭВ	р. Ом-см	
Система, группа	*а, с,* нм					
Ромбоэдр., £>3^	0,560 (а); 1,212 (с) [242]	2,52 [216]	2723 [16]	1,64 [16]	0,1-10 [16]	1300 [288]

г. 15. Полупроводниковые соединения [2^2]

Соединение	Кристаллическая структура		р, г/см®		' л .	hcO;, чВ	
	Система, группа	*а,* нм					
BP	Куб., Г2	0,4538	2,89 (242]	1400 **(Гразл)**	9в5	0,103	0,102
AlP	То же	0,547	2,85 [123] 2,40	2823	5^8 [178]	0,062	0,0545 [254]
AIAs		0,566	3.6 [121] 3.7	2013	417 [121]	0,050	0,0447 [254]
AlSb	» »	0,614	4,3	1327 [1231	292 [121]	0,042	0,0395[254:
GaN	Геке.,	0,318 (a); 0,5166 (c) [2421	**6,10 [242]**	1500 [242] 2000	600	—	—
GaP	Куб., т1	0,545	4,14	1740	446 [121]	0,0499	0,0455 [254]
GaAs	То **же**	0,569 [1]	5,4 [1211	1510 [123]	344 [121]	0,0362	0,0354 [251]
GaSb	» »	0,609 [1]	5,61	985 [123]	265 [121]	0,0298	0,0286 [254]
InN	**Геке.,**	0.353 ***(a)*** 0,569 ***(c)*** [242]	6,88 [242]	1200 [242] 1373	—	0,086	0,059
InP	Куб.,	0,586 [1]	4,79 [123]	1327 [123]	321 [121]	0,0435	0,038 [254]
InSb	То же	0,647	5,78 [121]	798 [123]	262 [121]	0,0244	0,0229 [254]
InAs	» »	0,606 [1]	5,68 [121]	1216 [123]	249 [121]	0,030	0,0272 [254]

Продолжение табл. 22.15

Соединение		^ос	cmV(B-c)	V-p, cmV(B-C)	Абсолютный МИНИМ зоны проводимости
BP	11,6 [242]		30-120	25-300	(100)
AlP	9,83 [254]	7,56 [254]	50 [28]	150 [28]	(100)
AIAs	11 [254]	9 [254]	75-300 1200 [115]	–	(100) [170]
AlSb	11,5 [27]	11,6 [170]	200 [121]	420 [27]	(100) [170]
	11,6 [254]	10,2 [254]	700 (77 K)	3700 (77 K)	
GaN	12,2 [214]	5,8 [214]	380 [214]	–	(OOO)
GaP	10,18 [170]	8,46 [170]	300 [123]	75 [27]	(100) [170]
	10,7 [254]	8,5 [254]	500 (77 K) [27]	420 (77 K)	
GaAs	12,53 1170]	i 1,6 [170]	8500 [27]	420 [27]	(OOO) [170]
	12,9 [254]	10,9 [254]	210 000 (77 K)	9000 (77 K)	
GaSb	15 [27]	15,2 [170]	4000 [27]	1400 [27]	(OOO) [170]
	16,1 [254]	14,4 [254]	6000 (77 K)	3600 (77 K)	
InN	—	9,3	20-200	–	(OOO)
InP	14 [27]	10,9 [170]	4600 [27]	150 [27]	
	12,4 [254]	9,6 [254]	40 OOO (77 K)	1200 (77 K)	(OOO) [170]
InSb	16,8	15,6 [254]	78 000 [27]	750 [27]	
	17 [27]	15,7	1 200 OOO (77 K)	10 000 (77 K)	(OOO) [170]
InAs	14,5 [271	11,6 [170]	33 000 [27]	460	
	14,9 [254]	12,3 [254]	82 000 (77 K)	690 (77 K) [27]	(OOO) [170]

Продолжение табл. 22.15

Соединение					(ООО) >n,	^(iii) "io
BP	2,0	—	—	—	–	—
AIP	2,45	1,1				
	2,5 (2 K)					
AIAs	**2,14**	**1,0**	—	0,29 [173]	0,124	
	2,23 (2K)					
AlSb	**1,63**	***OJ*** **[17i]**	—	0,75 [170]	0.09 [123]	—
	1,69 (4,2 K)					
GaN	**3,44**	–	–	–	0,2-0,4 [214]	–
	3,50(1,6 K)					
GaP	**2,27**	0,35 [170]	0,25 [185]	0,08	0,12 [123]	–
	2,35 (0 K)			0,1 [171]		
GaAs	**1,43**	0,38	0,5 [185]	0,33 [170]	0,067 [84]	–
	1,52 (2 K)					
GaSb	**0,70**	**0,4 [170]**	0.08		0,047 [170]	0,9 [170]
	0,811 (2 K)			0,8 [171]		**0,12 ( )**
						1,3 (11)
InN	~ 2,1				0,11	
InP	**1,34**	0,7 [170]	0,4 [84]	0,1 [171]	0,073 [84]	–
	1,42 (2 K)					
InSb	**0,180**	—	0,45-0,5 [84]	0,98 [170]	0,014 [170]	—
	0,236 (4K)					
InAs	0,36			0,38 184]	0,023 [170]	
	0,41 (0 K)			0,43 [170]		

Продолжение табл. 22.15

Соедине-	„(100) m_n	'"pi m_h		"'dp m_n	*dE /∂m.* 10-® эВ/К	*∂E /∂P.* 10-" эВ/Па	*Sn*
BP	—	—	—	–	–	–	–
AIP	-	0,63	0,20	—			
			0,39 [173]				
AIAs	0,5^0,8	0,5	0,22 [173]	—	- 4	—	—
			0,26				
AlSb	0,33	0,4 [123]	0,12 [170]	**0,9** [173]	- 3,5	- 1,6 [170]	
	0,25 (X) [84]		0,137 [173]		-4Г[123]	(100)	
	1; 1,64 **(11)**						
GaN		–	-	0,6-^-1,0	**- 3,9** [242]	—**4,2**	-
				[214]	- 6,7	(ООО)	
GaP	0,22 ( )[84]	0,5 [170]	0,13 [170]	—	—5,5 [170]	- 1,7 [170]	—
	1,15 **(11)**	0,56 [105]	0,16			(100)	
GaAs	1,2 [170]	0,475 (231)	**0,89 [232]**	0,5 [173]	- 5 (ООО) [170]	12,5 (ООО) [186]	0,52-0,37 [84]
	0,3 (.1)	0,5 (170)			- 2.4 (100)	- 8.7 (100) [170]	0,523 [170]
	2,0 (**II**)						
GaSb		0,23 [123	0,04	0,39 [173]	—3,5(000) [170]	14,5 (ООО)	—9
		0,36(x) 233]	0,052 **[233]**		+2(111) [123]	- 10 (111)	
		0,26(11) 233]					
InN							
InP		0,60 [105]	0,086 [170]		- 2,9 [123]	4,6 (ООО) [170]	
			0.12 [105]		- 4,6 [170]		- 0,6^**2к)]**
InSb		0,4 [123]	0,015 [123]	0,2 [173]	—2,8 [170]	15,5 (ООО) [170]	- 5 0 [170]
			0,020 [231]		- 2,9 [123]	14,2 (ООО)	- 4 8 [84]
InAs	-	0,4 [170]	0,025 [170]	0,33 [173]	**—37 1123**	4,8 (ООО)	- 14,7 [84]
						8,5(000) [170J	
						3,2 (111)	

Таблица 22.16. Свойства примесей в соединениях $A^{III}B^{V}$ [292]

Соединение			
AlP	-		0,15 (?) 0,37 (?)
AlAs	0,05 (Mg) 0,06 (Zn) 0,07 (Si)		
AiSb	0,068 (Te) 0,147 (Se) 0,160 (?)		**0,033 (?)** 0,041 (?) 0,102 (?)
GaN	0,017-0,042 (Kjsr)		0,225 (I/q,) 0,41 (Hg) 0,750 (Li) 0,37; 0,48; 0,65; 1,02; 1,42 (Zn)
GaP	0,061; 0,091 (Li) 0,072 (Sn) 0,085 (Si) 0,105 (Se) 0,107 (S) 0,204 (Ge) 0,897 (O) 0,930 (Te)		0,052 (?) 0,054 (C) 0,057 (Be) 0,060 (Mg) 0,070 (Zn) 0,102 (Cd) 0,210 (Si) 0,265 (Ge) 0,530 (Cu)
GaAs	0,058 (Si, Se, Pb, Vaa) 0,059 (Ge, Si, C)		0,027 (C) 0,028 (Be) 0,029 (Mg) 0,031 (Zn) 0,035 (Si, Cd) 0,040 (Ge) 0,113 (Mn) 0,167 (Sn)

Продолжение табл. 22.15

Соединение			
GaSb	0,145 (S) 0,085 (Se) 0,020 (Te). -0,3 (S) 0,2 (Se) <0,08 (Te)	**(III)** (100)	0,0094 (Si) 0,013—0,015 (Ge) 0,008-0,130 (?)
InP	0,106 (Tl) 1 0,175 (Si);		0,031; 0,108 (Mg) 0,031; 0,143 (Be) 0,041 (C) 0,046 (Zn) 0,057 (Cd) 0,098 (Hg) 0,210 (Ge) 0,270 (Mn)
InAs	0,020—0,025 (?)		0,01 (Sn); 0,02; 0,035 (?) 0,014 (Ge) 0,02 (Si)
InSb	-0,007 (S) -0,007 (Se) -0,007 (Te) 0,05 (Te) 0,15 (Se) 0,25 (S) 0,55 (?)	(OOO) (111)	0,008 (Co) 0,0091; 0,0099 (Zn) 0,00925 (Ge) 0,0095 (Mn) 0,0099 (Mg) 0,013 (Fe) 0,028; 0,056 (Cu) 0,030; 0,056 (Ag) 0,07 (Cr) 0,12 (?)

		р. г/смз	^пл, К		
Геке., Dt^	0,3585 (с); 1,55 (с) [150]	3,75 [288]	1235 [28lS]	215 [288]	3,06 (77 K)
То же	0,3755 (а); 1,594 (с) [150]	5,03 [150]	1211 [294]	190 (0 K) [294]	2,09 [294]
	P- и е- GaSe [294]				
Моноклин.,	1,744 (а); 1,046 (6);	5,44 [150]	1097 [294]	158 [294]	1,7 [152]
С-	0,4077 (с) [294]		1108 [150]		1,8(0 K) [294]
	0,394 («); 0,444 ***(Ь);***	5,18 [150]	965 [150]	–	
Орторомб.,	1,064 (с) [150]				2;У^(4!2 K)
	0,400 (а); Е : 1,670 (с);	5,55-5,72	888 [288]	**190 [294]**	1,18
Геке.,	Т: 2,495 (с) [294]	[150]	933 [150]l		1,32 (30 K) [294]
Тетр., D11	0,8437 (а); 0,7139 (с) [150]	6,29 [150]	966 [150]	–	0,26-0,36 [288]
То же	0,779 (а); 0,679 (с) [150]	7,61 [150]	623 [150		1,36 [294]
	0,803 (а); 0,701 (с) [150]	**8,2 [288]**	607 [288	180 [294]	0,75 [294]
		8,15 [294]	623 [294		0,7 [32]
	1,294 (а); 0,6158 (с) [150]	**8,42 [150]**	573 [288		
			603 [150]		

Продолжение табл. 22.15

Соедине-	*dEJdT,* 10-»^эВ/Па (10-»эВ/ат)			CMV(B-C)	CMV^B-C)	[294]	'оо 1294]
GaS	- 7 , 2 [288]	5 [288]	-	12 [294]	80 [294]	5,9 (£| i c) 10,0 (£xc)	5,3 *(E* Ll C) 6,7 *(Ei_c)*
GaSe	- 4 KO]	0,51 [288] 0,5 (X) [294] 1,6(11) [294]	1,34 [288] 0,8 (_L) [294] 0,2 (Il) [294]	80 (Ll *c)* [294] 300 (J_ *c)*	210(lic)[294] 60 (X *c)*	6 18(£|lc) 10,6 (£xc)	5,76 (£ lie) [294] 7,44 (£xc)
GaTe	- (4 - 5) [294j		1,31 [288]	50 [31] [288]	15 [152] 40 [150]	10,58 (£• Ll c) 9,66 (Я 1 *c)*	7,29 (£ lie) [294] 6,97 (£xc)
InS	- 6 [10] - 7 , 9 [294]	0,4 [294]	-	50 [294]	–	–	15,2 [2'34]
InSe	- 4 , 2 [288]	0,12—0,16 [294]	0,5 (.L c) [294] 1,5 (1U)	900 [294]	1,4-10' г-2/3 (X *c)* [294]	5,4 (E lie) 8,6(£xc)	4,9 (£|lc) [294] 6,2 (£xc)
InTe		0,09 [294J	0,26 [294]	- ^ = 0 . 7 5 *i^p* [294]	150 [294]		14,7 (£ lie) [294] 14 (£ 1 e)
TIS	-	0,07 [294]		- ^ = 0 , 4 [29^1	20 [294]	-	
TlSe	; t i i ^	Ikd,			15-150 [288]	15-20 (£ Ll *c)* 34-44 *(EJ-C)*	12 [294]
TITe		0,03 (mj„) [294]		[288]	60 [294] 1120 (4,2 K)		

Таблица 22.18. Полупроводниковые соединения ВУ'

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа		р, г/см»	^лл, К	i	*дЕ /дТ.* 10-»э В/К	CMV"B.C)	
a-A^Oз	Геке, D8^	**0,4758 (o); 1,295 (c) [242]**	–	2323 [242]	2,5 [242]	–	–	
a-Ai^Ss	Геке., C^	**2,3-2,5 [288]**	2,32 [242]	1373 [242]	4,1 [242]	-11,5 [242[	—	
c-AbSeg	Моноклин. ,	**1,168 (a); 0,673 (6); 0,733 (c); P = 121,1°** [150]	3,91 [150]	1253 [150]	3,1 [150]	-11,2 [10]		
AЬTез	Геке.,	0,408 (a); 0,694 (c) [1501	4,5 [150]	1168 [150J	**2.2 [150] 2.3 [123]**	–		
P-Ga,S3	То же	0,3685 (a); 0,6028 (c) [288]	**3,65-3,74 [150]**	1398 [150]	**2,84 [123]**	- 7 [58]	28 [150]	
a-Ga,Se3	Л'юноклин. ,	1,114 (й); 0,641 (6); 0,704 (e); 121,2° [150]	**4,92 [150]**	1293 [150]	**1,75 [1Б(**	- 5 [16]	10 [16]	
a-OазTбз'	Куб.. Tj	0,589 (c) [150]		1065 [150]	**1,56 [31 1,4 [150**	- 6 [242]	340 [123]	
In^O"	Куб.	**1,012 (o) [132]**	**5,67 [150]**	2270 [132]	**2,8 [132**	- 8 [132]	270 [60]	
P-In,S3	Куб.,	**1,072 *(a)* [150]**	5,92 [150]	1363 [150]	**1.1 [150]**	- 7 [10]	<100 [150]	г
a-InaSej	Геке.	**1,60 *(a)*\ 1,924 (c) [150]**	5,67 [150]	1173 [150]	**1.2 [10]**	- 4 [10]	125 [150]	(
a-InaTe"	Куб., П	**1,840 *(a)* [121]**	5,8 [121]	940 [150]	1,02 [150] 1,12 [16]	—4 [242]	10 [150] 15-70 [16]	[г

« =26 CMV(B-C): =0.39: *m.Jm^* = 0,23 I

•Sm^../m„ = 0,53 [60].

"^m .Jmo = 0.7; **ш /нг„= 1,1 [150].**

Таблица 22.19. Электрофизические свойства галогенидов таллия [294]

Соеди-	Кристаллическая структура		г/см®	m к"	D ' K	E^, эВ			cmV(B.c)	cmV?B C)		'<x>
	Система, группа	а, ™										
TlCl	Куб., 0|	0,384	7,02	704	393	3,2	0,5-0,7	0,6-1	20 5000 (4,2 K)	67 OOO (4,8 K)	32,7	4,76
TlIr	То же		0,399	7,45	733	290	2,64 (4,2 K)	0,5	0,7	30 40 OOO (1,8 K)	4 35 000 (1,8 K)	30,6	5,34

W

Рис 22 126. Зонная структура GaN, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb 1121. 170, 1711

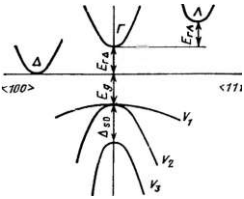


Рис. 22.127. Зонная структура BP, AIP, AlAs, AlSb [121, 170-172]

ſ

Z ^ m^ 11
10^/T,^'^

Рис. 22.128. Температурная зависимость удельного сопротивления монокристалла n-BP (247)

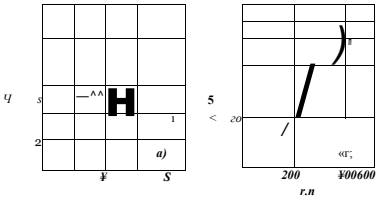


Рис. 22.129. Температурные зависимости концентрации электронов (а) и их холловской подвижности (б) в монокристалле BP [247]

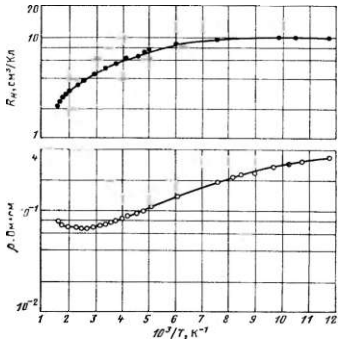


Рис. 22.130. Температурные зависимости коэффициента Холла и удельного сопротивления n-AIP [248]

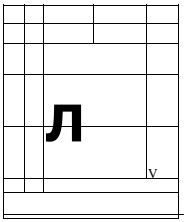


Рис. 22.131 Температурная зависимость холловской подвижности электронов в AlSb [250]

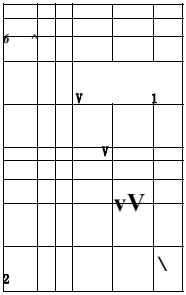


Рис. 22.132. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в AlSb [251]

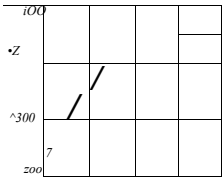


Рис. 22.133. Зависимость подвижности дырок в AlSb при 7=293 К от их концентрации 1170]:
сплошная линия-расчет для комбинированного рассеяния на акустических фононах и ионизированных примесях

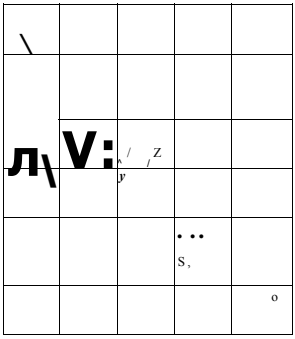


Рис. 22.134. Температурная зависимость концентрации электронов для кристаллических пленок GaN [253]:

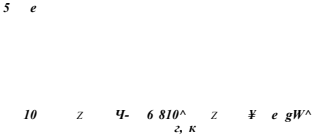


Рис. 22.135. Температурная зависимость холловской подвижности электронов для двух кристаллов GaN [253]:
кристаллы те же. что на рис. 22.134

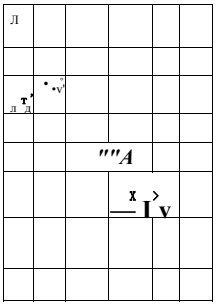


Рис. 22.136. Температурные зависимости холловской подвижности электронов в различных кристаллах GaP [256]:
точки - данные разных работ; сплошная лнння — расчет

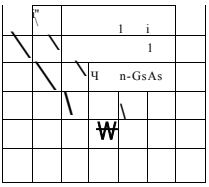


Рис. 22.138. Зависимости удельного сопротивления п р-GaAs при 7=300 К от концентрации электроне:; i;:: дырок [257]

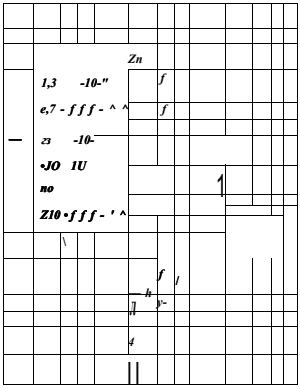


Рис. 22.137. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в различных легированных Zn кристаллах GaP при разной концентрации Zn [256]

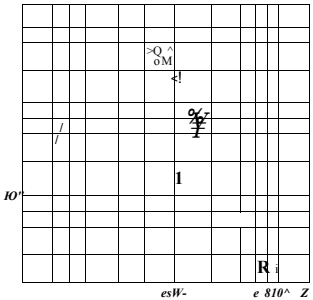


Рис. 22.139. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в GaAs: —— линии — расчет без учета ( ) и с учетом (—) рассеяния электронов на ионизированных примесях; точки — данные разных рабо.т [258]

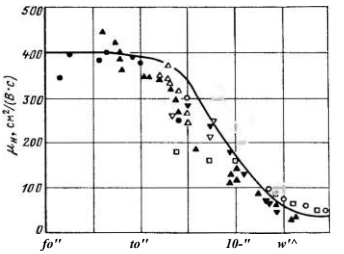


Рис. 22.142. Зависимость холловской подвижности дырок при 7"=300 К от концентрации дырок в GaAs:
сплошная линия – расчет [259]; точки – данные разных работ

2 ¥ Б S 10^ Z
7, К

Рис. 22.140. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в GaAs [259]:
концентрация акцепторов и доноров V^ и /V^, 10" см-': О –3,3 и 1,8; Л - 11 и 3; ф - 7 н 5,5

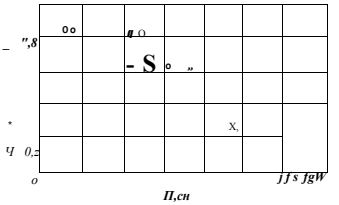


Рис. 22.141. Зависимость холловской подвижности электронов при ***Т= 300*** К от концентрации электронов в легированных Sn кристаллах GaAs:
пинния – расчет [260]

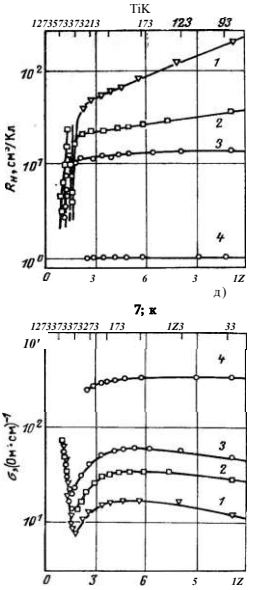


Рис. 22.143. Температурные зависимости коэффициента Холла (а) и проводимости (б) кристаллов GaSb [170]:
концентрация растет от i к 4

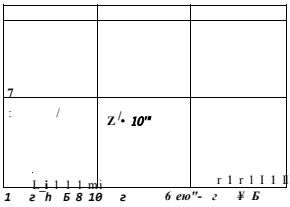
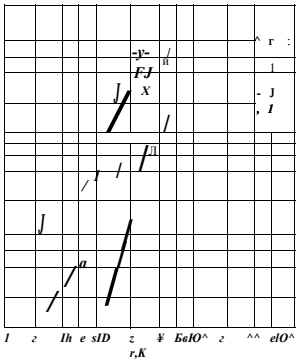


Рис. 22.14^ носителей Температурные зависимости подвижности G::Sb с различной концентрацией носителей и р-' (нижняя кривая) типа [127]



46 Температурная зависимость холлов! подвижности электронов в InP [262]:
10= см-=: i - 2 (Си); 2 - 5 (Fe); 3 - 5 (Те. Си);

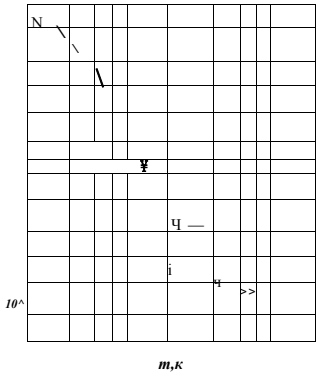


Рис. 22.145. Температурная зависимость холловской подвижности электронов InP:
сплошная линия-расчет |261]; *п* (300 К), 10= см-»: »- 2; А — 1.7; О —4: Л—6

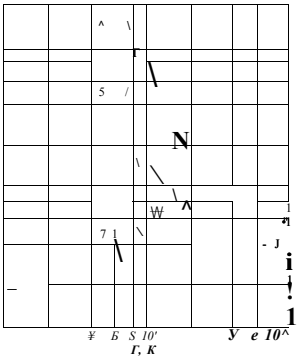


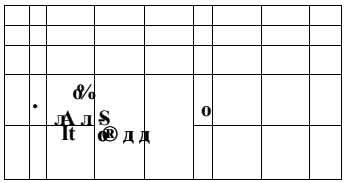
Рис. 22.147. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в InP [263]:
о (300 К), 10 " СМ-S; 1–0.7; 2-1; 3-3; 4-13; 5-30; 6-56; 7-85

5

*If e g 10^*

г,К

Рис. 22.148 Температурные зависимости холловской подвижности электронов в InAs:
линия - расчет [255]; *п* (300 К), Ю® с. д - 1.7; 0 - 4 : А - 0 . 4



я.с и '

Рис. 22.149. Зависимость холловской подвижности электронов при Г=300 К от концентрации электронов в кристаллах InAs с различной степенью компенсации K-^NaINO [247]:
зплошная линия – расчет; О – К<0,15; Л – 0.15<К<0.3; *ш* - к>0.3

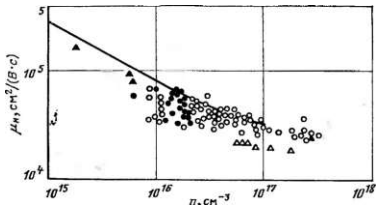


Рис. 22.150. Зависимость холловской подвижности электронов при 7"=77 К от концентрации электронов в кристаллах InAs [247]:
сплошная линия – расчет; ф – нелегировг -ный образец; О – легирован Си; Л – легирован Sn–Zn; ^ • - эпитаксиальные пленки

0,07

0,06

0,05

^0,03

0,02

0,0 i

Рис. 22.151. Зависимость эффективной массы электронов в n-InSb от концентрации электронов [2641:
ПИЯ – расчет по теории Кейна; точки – данные из разных работ

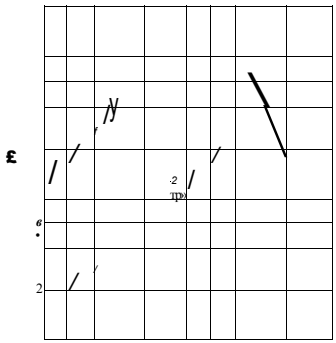


Рис. 22.152 Температурные зависимости подвижности электронов в чистом (/) и легированном (2) (концентрация примеси >10'« СМ-») кристаллах InSb [265]

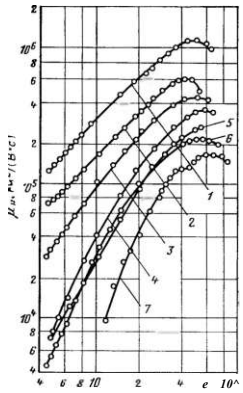
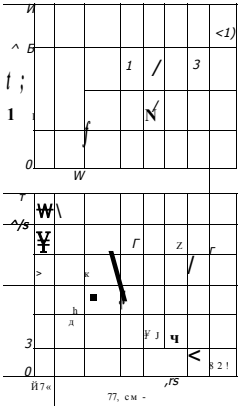


Рис. 22.153. Температурные зависимости подвижности электронов в кристаллах InSb с различной концентрацией примесей [266]:

1 образца	см-»			Iи., (30 К). СМV(В-С)
2	1.2- 10"	6,5- 10"	0.50	830 000
	1.9- 10»	1.3- 10"	0.75	480 000
	9.8- 10"	1.6- 10«	0.88	330 000
	1.4. 10»	2.3- 10«5	0.99	160 000
6	1.6- 10"	2,6- 10"5	0.99	150 000
	3.6- Ш"	1.9- 10«		150 000
	6,2- 10"	2,7-10"	0'99	92 000



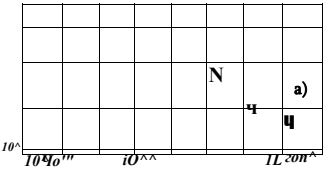
77, см -

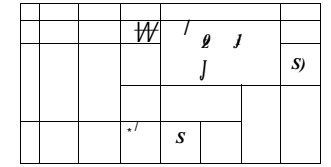
5 В

Рис. 22.155. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в InSb [268]

eos z

г, к





/7,СМ-3

Рис. 22.156. Зависимости подвижности дырок в InSb при Г=290 К (о) и Т=77 К (б) от концентрации дырок [268-270]:

сплошные линии (б) – расчет с учетом рассеяния дырок на оптических фононах (/), примесных нонах (2), акустических фоионах (3-Ех=7 эВ; 4—Е,=21 эВ), примесях и акустических фононах (5); точки – данные из разных работ

Рис. 22.154. Зависимости подвижности электронов в InSb при Г^ЗОО К (а) и Т=77 К (б) от концентрации электронов [267]:

сплошные линии — расчетные зависимости дрейфовой подвижности при значениях =1 (/); 2 (2): 5 (3); точки — данные из разных работ

Рис. 22.157. Зонная структура GaS, GaSe, InS, TIS (а), GaTe (6). InSe (е) [294]:

Соединение	GaS	GaSe	GaTe	TnS	tnSe	TIS
г. 9В	-	0,025	-	0,55	0,076	0,2

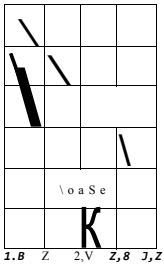
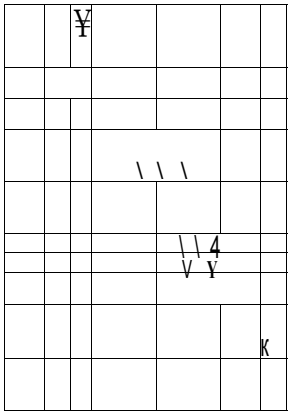


Рис. 22.158. Температурные зависимости проводимости кристаллов n-GaS и n-GaSe в плоскости слоев [271]

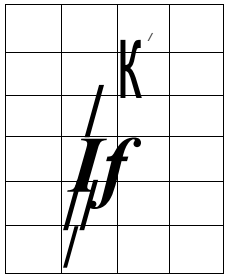


Г, К

Рис. 22.159. Температурная зависимость холловской подвижности носителей в кристаллах GaS (ток—вдоль слоев, магнитное поле—поперек слоев).

Метод получения и тип кристалла:

йодный транспорт, *п-ткФ*, ф – осаждение из газовой фазы, п-тип; Л, О -- осаждение из газовой фазы, р-тип [272, 273)



w^/r.K-

Рис. 22.160. Температурные зависимости удельного сопротивления кристалла GaS вдоль (•) и поперек (О) слоев [274]

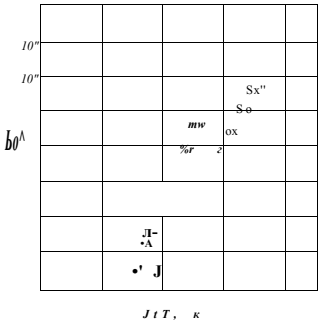


Рис. 22.161. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов p-GaSe (ток — вдоль слоев, магнитное поле — поперек слоев) [275]:
X, +, **о, д. D** – нелегированные кристаллы GaSe; легирующая добавка: • . ® - 10% Ge; A 5% Zn

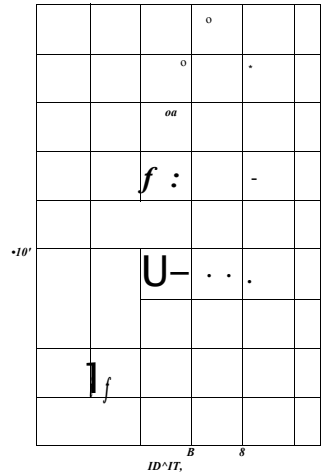


Рис. 22.162. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов p-GaSe (ток — вдоль слоев, магнитное поле — поперек слоев) [275]:
О. А. »елегированные кристаллы GaSe; легирук,^»я добавка: Zn; Y - 0 - 5 % Zn; J^ - 0.1 % Zn; « . X - Zn; Zn

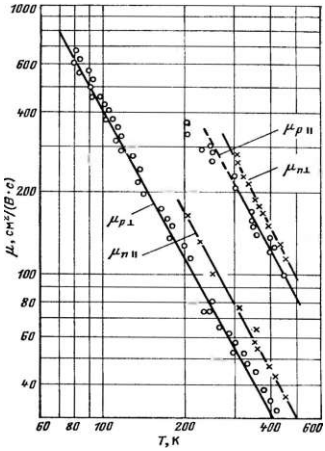


Рис. 22.163. Температурные зависимости подижности носителей в GaSe [276]:
P-pll . (x„ II · холловские подвижности дырок н электронов вдоль и поперек слоев

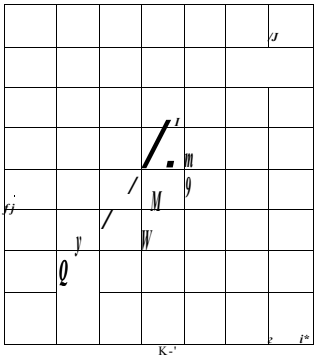


Рис. 22.164 Температурные зависимости удельного сопротивления различных кристаллов GaTe |2771:
зачерненные символы – •юпег-к слоев, остальные символы – вдоль слоев; кристалл!: ф. . – травление; у -Ь – слабое травление, О – холо„;;ая ^;.работка; х — легк;,,ование Си

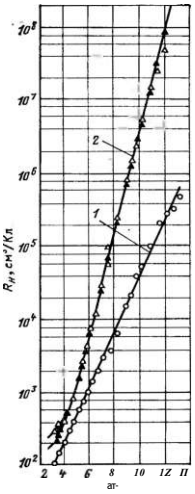


Рис. 22.165. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов GaTe (ток — вдоль слоев; магнитное поле — поперек слоев) [278]: образцы I и г — из различиых партии

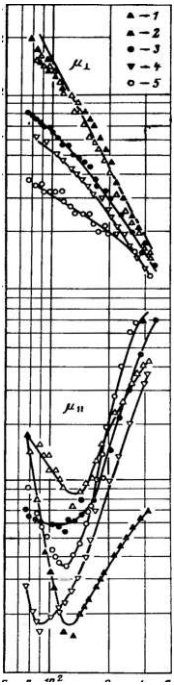
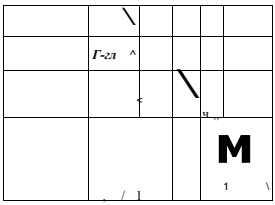


Рис. 22.167. Температурная зависимость холловской подвижности дырок для кристаллов p-GaTe [278]: слоев; *t^ b* .



г, к

Рис. 22.166. Температурная зависимость подвижности электронов в поликристаллических образцах GaTe, состоящих из больших монокристаллических областей (ток — вдоль слоев) [279]

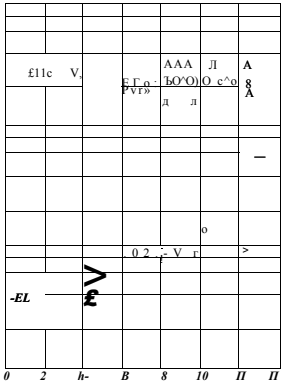


Рис. 22.168 Температурная зависимость удельного сопротивления кристаллов InS, выращенных из расплаконцентрация электронов (Г-ЗОО К). 10» см-': ^ - 9 : А - 6 , 5 ; О - 5 , 5 ; ф - 4 , 5

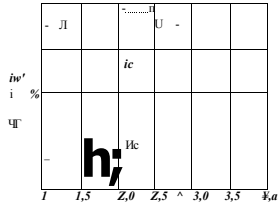
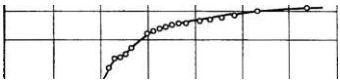


Рис. 22.170. Температурная зависимость проводимости InTe вдоль (ii *с*, О) и поперек (± с, ф) оси *с* [282]



I «

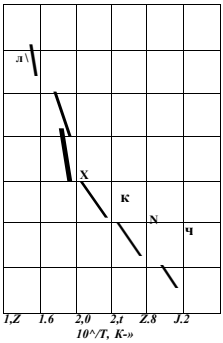


Рис. 22.169 Температурная зависимость проводимости различных кристаллов **InSe** вдоль (А) и поперек (ф) оси с [281]

О Z ч- Б 8 10 12

Рис. 22.171. Температурная зависимость удельного сопротивления различных кристаллов T1S (ток — вдоль оси) [283]

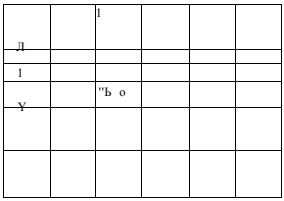


Рис. 22.172. Температурная зависимость удельного сопротивления ElSe (ток — вдоль оси) [283]

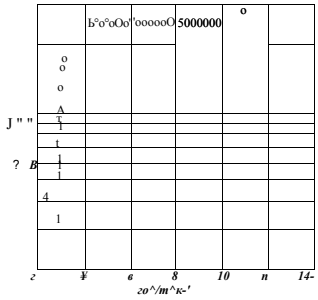


Рис. 22.173. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов TlSe в поле В=13 кГс (ток — вдоль оси с, магнитное поле — поперек оси с в направлении [ПО]) [283]

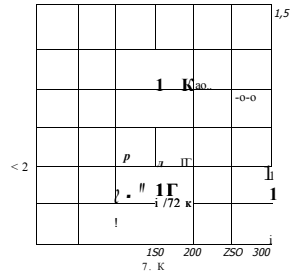
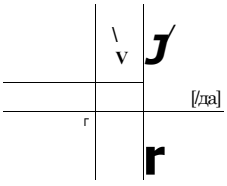


Рис. 22.174. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла для поликристаллического образца TlTe [284]. При Т=172 К происходит фазовый структурный переход от тетрагональной (при 7'>172 К) структуры к орторомбической



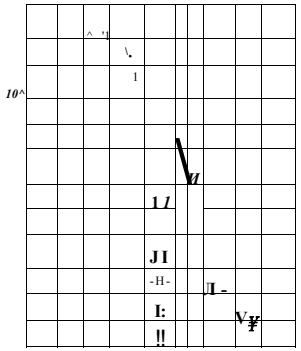


Рис. 22.176. Температурная зависимость холловской ф, О) и дрейфовой (А) подвижности фотовозбужденных носителей в TlCl [285]
ф — дыркн; О, Д — электроны

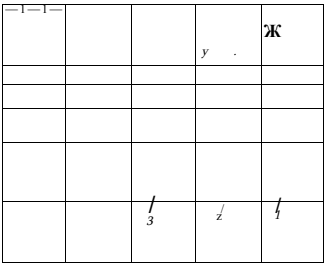
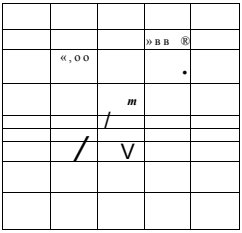


Рис. 22.177 Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в кристаллах TlCl с различной концентрацией ловушек, см"':
/-бД-Ю'"; 2-1,2-10"=; 3 - 3,3 • 10", сплошная линия - чистый кристалл [286]

Рис. 22.175 Зонная структура TlCl, TlIr [294]:

Соединение	TlCl	TlIr
Д, эВ 8. эВ	1.7 0.2	1.04 0.27



даУт-к-'

Рис 22.178. Температурные зависимости дрейфовых подвижностей электронов и дырок в ТШг [287]

22.3.4. Соединения типа Л^vBIv—^'v^v*

Из полупроводниковых соединений типа Л^'вт „3. вестно 8пзА82, кристаллизующееся в ромбоэдрической решетке {Гпл = 870 К,-Eg = 0,47 эВ, (Хр = 270 cmV(B-c) flOO]).

Наиболее изученными соединениями типа Ai^svi являются халькогениды свинца (PbS, PbSe, PbTe), кристаллизующиеся в гранецентрированной кубической решетке O/j. Зонная структура — прямая, причем абсолютные экстремумы зон расположены на краю зоны Бриллюэна в направлении [111] (см. рис. 22.181). Вблизи экстремумов поверхности постоянной энергии представляют собой эллипсоиды вращения (их эквивалентное число равно 4 для каждой зоны). Валентная зона расщеплена на две подзоны; нижняя из них (подзона тяжелых дырок) имеет максимум внутри зоны Бриллюэна на осях [111] и проявляет себя в материалах р-типа при повышенных температурах (для PbTe при T^400 К). Халькогениды свинца обладают аномально высокой диэлектрической проницаемостью.

Некоторые соединения рассматриваемого типа характеризуются непрямой зонной структурой, как это имеет место, например, в SnS, SnSe (см. рис. 22.216), или обладают сложной зонной структурой (см. рис. 22.211 для SnTe). Тип проводимости рассматриваемых соединений часто определяется отклонением от стехиометрии.

Таблица 22.20. Электрофизические свойства SiC

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа		'•пл. К	р, г/см=	Гд, К	эВ	fi* t'	
a-SiC	Геке., С,	0,308 (а); 1,511 (С) [292]	3073 [132]	3,21 [193]	1200 [193]	0,119 [194]	0,098 [194]	10,2 [124] 9,8 [194]
p-SiC	Куб., Г2	0,436 [1]	2600 [124] Ф а)	3,21 [132]	1430 [288]	0,103 [292]	0,094 [292]	9,7 [288]

Продолжение табл. 22.26

Соединение		Я^.эв	∂E 10-4 эв/к	m_{n}/mo		CMV(B . C)	см2/(В • с)
a-SiC	6,9 [124] 6,73 [194]	2,86 [292]	- 3 , 8 [85]	0,25 (±с); 1,5 (11 с) [292]	1,0 [123] 1,2 [124]	230 [34]	70 [16]
f-SiC	6,5 [288]	2,4 (2 К) [292]	- 5 , 8 [15,79]	0,24 (Х с); 0,65 (Ш с) [292]	0,59 [15]	1000 [288]	

Таблица 22.21. Электрофизические свойства ТЮг, TiaOg, ТЮ

	Кристаллическая структура			р. г/см=			
TiOg (рутил)	Тетр., ОЦ	0,454 (а); 0,296 (с)		4,28 [209]	140 (хс) 260 (II с)	7 [211]	670 [242]
					89 (⊥ с)	9 (с) [25]	
					173 (II с)	6,8 (II с)	
	Триг., d I ,	0,516 (а); 1,357 (с)	2400	4,93-5,13 [288]	-		
ТЮ	Куб., 01	0,4177	2010	5,82 [288]			

Продолжение табл. 22.15

Соединение	E^.ЭВ	cmV(B•C)
TiOa (рутил)	3,0 [16]	0,16 (xc) [25] 0,57 (II c)
T1rOз	0,02 [288]	~1000 (4,2 K) [288]
TЮ	0,1 [288]	~1 [288]

Таблица 22.22. Электрофизические свойства окиси и халькогеиидов свинца [125, 294]

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа		ρ, г/см3	$T_{пл}$, К				*dEg/dT.* 10-^ эв/К	*dEg/dP.* Ш-^ эВ/Па (10-вэВ/ат			
PbO	Тетр., Dlf,	0,397 (a); 0,502 (c)	9,53	1163	2,07			I				
PbS	Куб.. o1	0,594	7,6	1387	2,03 (4,2K) 0,41 0,31 (77 K)	1,46	1,67	4; 5,2		0,105	**0,080**	0,105	0,075
PbSe	То же	0,612	8,3	1355	0,29 (4,2 K) 0,278 0,176 (77 K)	1,36	1,72	4; 5,1	-8; -8,6	0,070	0,040	**0,068**	0,034
PbTe	» »	0,650	8,2	1190	0,145 (4,2 K) 0,32 0,22 (77 K) 0,19 (4,2K)	**1,11**	0,77	4,5	-7,5; -8	0,22	0,024	0,24	0,025

Продолжение табл. 22.22

Соединение	CMV(B • C)	CMV(B • C)	и. (300 K), 10^ см-^			МэВ	МэВ	*Tп* (200 K), K	*C*	<
PbS	610 11000(77 K) 68 500(4,2 K)	620 15 000 (77 K) 80 000 (4,2 K)	**2,0**	175	17	**26,3**	8,2	227	12	13
PbSe	1000 15 500 (77 K) 139 000 (4,2K)	1000 13 700 (77 K) 57 900 (4,2K)	3,0	250	24	16,5	5,4	138	27 (II) **19,6(j.)**	32 (II) **17.1(1)**
PbTe	1730 31 600 (77 K) 800 000 (4,2K)	840 21 600 (77 K) 250 000 (4,2 K)	1,5	400 1000 (77 K) 3000 (4,2 K)	33	13,6	3,9	125	**60(11)** 16 (X)	**58(11)** 19(X)

г параллельно (перпендикулярно) большой оси эллипсоида энергий.

Таблица 22.23. Полупроводниковые соединения

	Система, группа				*To-* K	*dEg/dT.* 10-^ эВ/К [294]
SisTea	Геке., C1	0,743 (a); 1,347 (c) [288]	4,5 [288]	1165 [288]		
GeS	OpToroM6.,D'®	1,044 (a); 0,365 (fc); 0,430 (c) [1]	4,01 [114]	895 [35] 938 [294]		
GeSe	То же	1,079 (a); 0,382(6); 0,438 (c)[1]	5,52 [114]	943 [114]		
GeTe	Куб.,	0,602 [114]	6,19 [114]	993 [114]	166 (<1 K) [164	
SnS	Орторомб., D^^	1,118 (a); 0,398 (fc); 0,433(c)[1]	5,08 [114]	1155 [216]	270 (80 K) [114]	
SnSe	То же	1,157 (a); 0,419 (fc); 0,446 (c) [1]	6,18 [114]	1133 [216]	210 (80 K) [114]	
SnTe	Куб., Ci	0,'632 [Ш]	6,45 [114]	1079 [114]	140 [114]	
SnOa	Тетр., D1l	0,472 (a); 0,317 (c) [1]	6,95 [216]	1400 [216]	570 [294]	12
SnSa	Триг., Dla	0,364 (a); 0,587 (c) [1]	4,5 [216]	1038 [294] 1143 [288]		**-8,6**
SnSea	То же	0,381 (c); 0,614 (c) [288]	6,01 [294]	923 [216]		

		[294]				[294]	Г294]
Sijes	1,89 [294]	5,4 (‖ *c)*	5,4 (‖ *c)* [294]		2 • 10-3 (||c) Г294]		
GeS	1,65		0,3-0,7 [294]		90(294]	25—30	10-15
	1,74 (4,2K) [294]						
GeSe						22-30	14-22
	I n H i M]						
GeTe			1,15(/n,,i)[114]		150 [126:	40 [288]	36
	0,1-0,2 [294]		5,0 (mpa)				
SnS		0,45(/nd,,)	0,95 (m^p) [127		90 (xc) [127]	32-48	
	1,07 [3]		0,2 [m j				14—16
			1,0 (m,,)				
SnSe	0,9-0,95		0,15 (тар){Щ			42-62	
			0,07 [288]^^				13-17
SnTe	0,19 [294]		0,13 {m,,i)		1700	1770	
	0,26 [114]		0,09 (/nj,) [294]			1200	
			3 (mapiT		350cГ000K)[114]		
SnOa	3,54 [288]	0,30{mj^)			300 [69]	9,6-13,5	3,8-4,2
	3,97 [98]	0,23 (m,,)		8800 (77 K)			
		0,22(/nd,,)[69					
SnSs	2,07 [183]					6-20	5,6-8,8
SnSe^	0,97 [183]	0,4				10-21	9,4—10,7
		2,9(md,,)					
		взаимной ориен					

I A

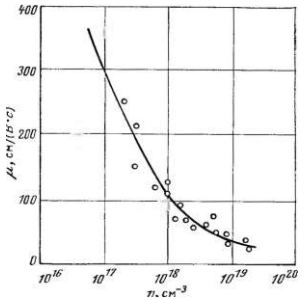


Рис. 22,179. Зависимость дрейфовой подвижности электронов в a-SiC при *T = 300* К от концентрации электронов [295]

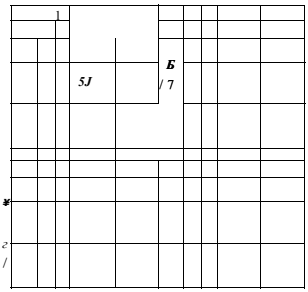


Рис. 22.180. Температурная зависимость дрейЛовой подвижности дырок в кристаллах a-SiC [296]:

N ^ , 10"см-' . 10" СМ»

	Атмосфера Ar
	То же
	Добавка C1 к
	t r '
230	Добавка CO к
	мосфере Ar
120	Добавка C1 к
190	Атлюс51ер

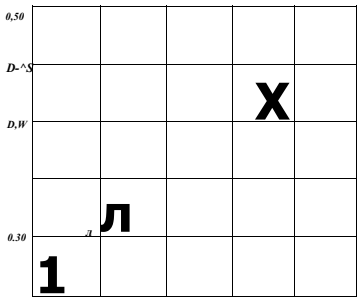


Рис. 22.18!. Зонная структура PbS, PbSe, PbTe [125] (значения параметров см. в табл. 22.22)

Г, К

Рис. 22.182. атурная зависимость ширины запрещенной зоны PbS [297]

Рис. 22.183. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в PbS [297]

S0 150 Z50 J50
Г, К

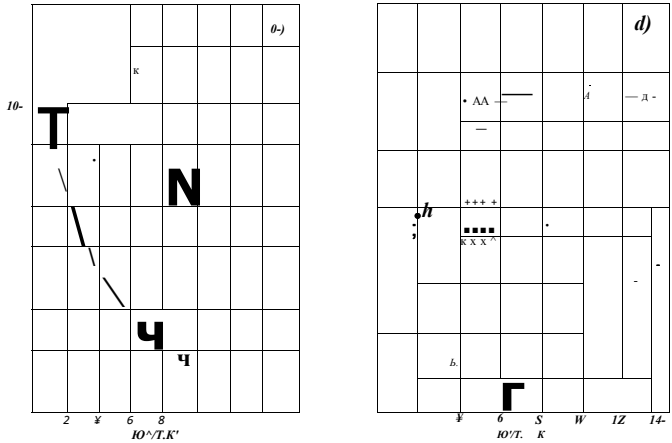


Рис. 22.184. Температурные зависимости удельного сопротивления (с) и коэффициента Холла (б) кристаллов n-PbS

концентрация носителей растет от / к 7

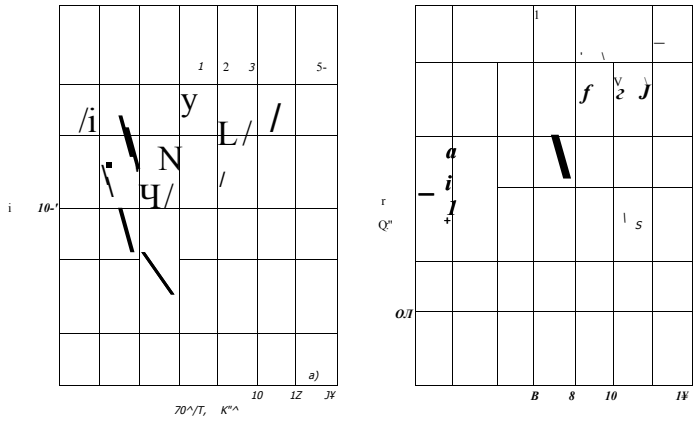


Рис. 22.185. Температурные зависимости удельного сопротивления (с) и коэффициента Холла (б) кристаллов p-PbS Г2281:
концентрация растет от I к 5

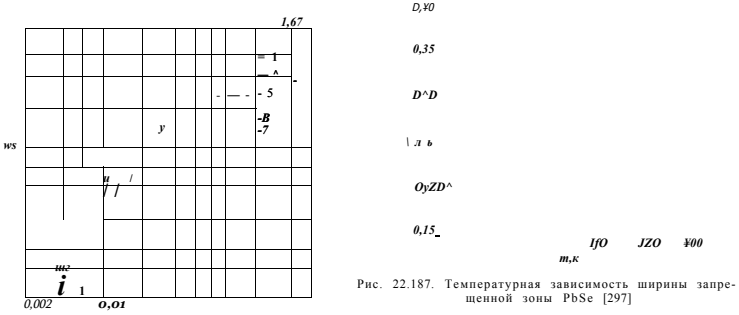


Рис. 22.186. Температурные зависимости холловских подвижностей электронов и дырок в кристаллах PbS [117]:
концентрация носителей. Ш" см-^: /—2,66 (р); 2—4,25 (п): 3-7.45 («); 4-4.63 (R); 5-2.72 Щ); 6-0.184 (п); 7-0.164 (п)

Рис. 22.187. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны PbSe [297]

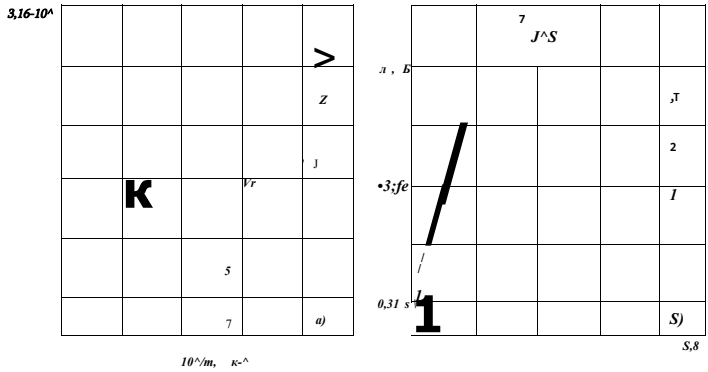


Рис. 22.189. Температурные зависимости проводимости (с) и коэффициента Холла (б) кристаллов n-PbSe с различной концентрацией доноров [117]:
концентрация доноров, см-=: /-1,е-1О'"; 2 - 7 , 8 - 3 - 3 . б - Ю "; 4 - 1,58-Ю": 5 - 1,26 • 10"; 6 - 4,9 • 10%; 7 - 3 • Ш =

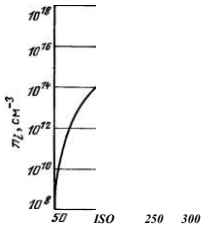


Рис. 22.188. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в PbSe [297]

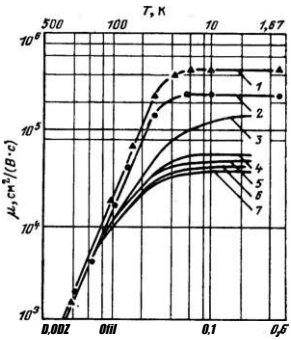


Рис. 22.190. Температурная зависимость холловской подвижности электронов и дырок в кристаллах PbSe [117]:
концентрация носителей, 10" см-': /—0.16 («); г—0,11 (р); 3 — 3,6 (п); 4 — 4,3 (р): 5 — 1,4 (р); 6 — 3,5 (р); 7 — 2,4 (п)

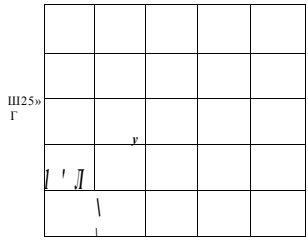


Рис. 22.191. Температурная зависимость ширины запре-.щенной зоны РЬТе [297]

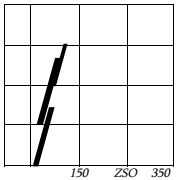
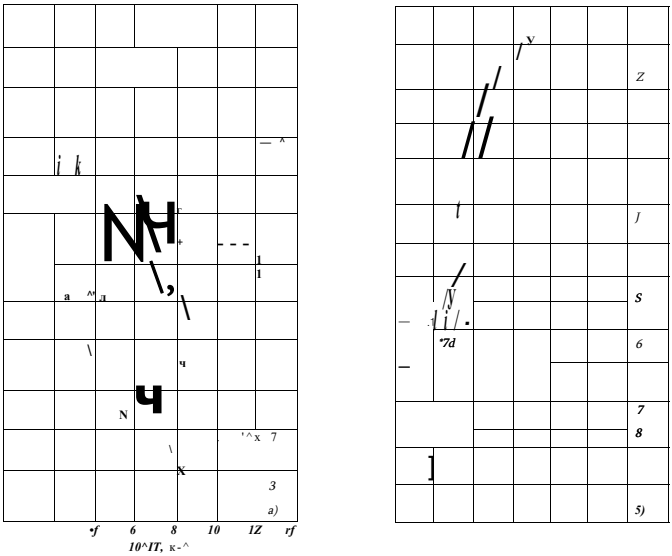


Рис. 22.192. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в РЬТе [297]



Температурные зависимости удельного сопротивления (о) и коэффициента Холла (б) различных кристаллов РЬТе [И?]:
1. г—почти собственные образцы; 3—S—р-РЬТе; концентрация носителей растет от i к S

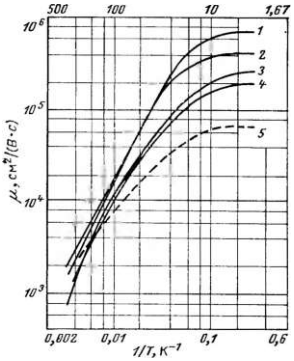
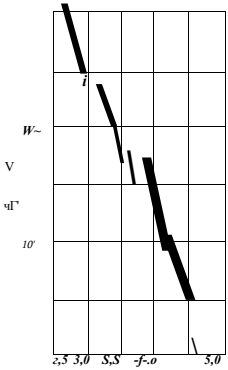


Рис. 22.194. Температурные зависимости холловских подвижностей электронов и дырок в кристаллах РЬТе с различной концентрацией носителей, 10® см-^: /-1.0 («); 2-0.58 (п); 3-2,1 (р); 4-3,0 (р); 5-9,5 (п) [117]



р„с. 22.196. Температурная зависимость проводимости иглообразных кристаллов p-GeS [298]

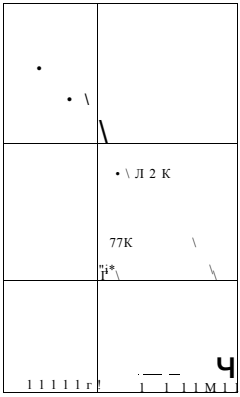


Рис. 22.195, Зависимости подвижности электронов РЬТе при Г=77 и 4,2 К от их концентрации [125]: точки – данные разных авторов

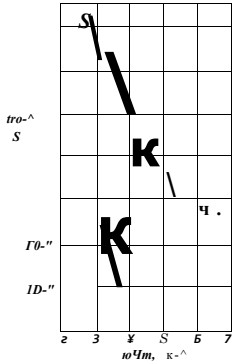


Рис. 22.197. Температурные зависимости проводимости кристаллического (1, поперек оси с) и аморфного (2) GeS [299]

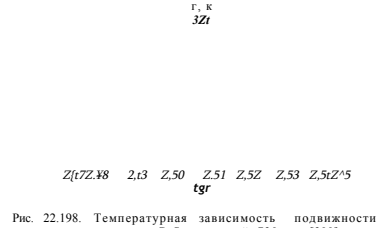


Рис. 22.198. Температурная зависимость подвижности дырок для пленки GeS толщиной 730 нм [300]

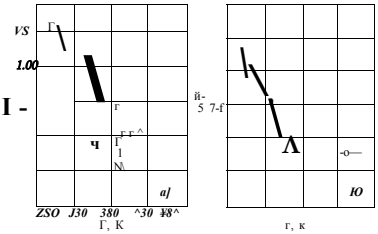


Рис. 22.200. Температурные зависимости удельного сопротивления (с) вдоль осей *a* |ф) и *b* (О) и коэффициента Холла (б) в плоское?.! (001) для GeSe [302]

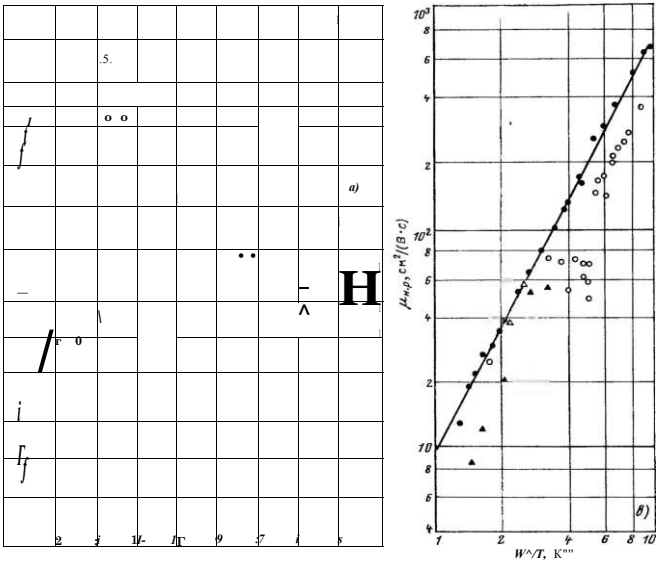


Рис. 22.199. Температурные зависимости удельного сопротивления (а), коэффициента Холла *(б)* и подвижности дырок (в) поперек оси с для различных кристаллов p-GeSe стехиометричсского состава [301]

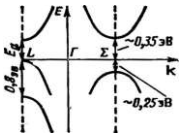


Рис. 22.201. Зонная структура GeTe [294]

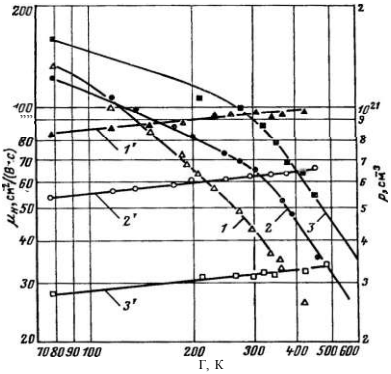


Рис. 22.203. Температурные зависимости холловской подвижности (2, S) и концентрации дырок (2', 3') в поликристаллических образцах и монокристаллических пленках (/, /') GeTe [304]; температура осаждения пленок на стеклянной подложке. •>€: 2. 2' - 250; 3, У - 300

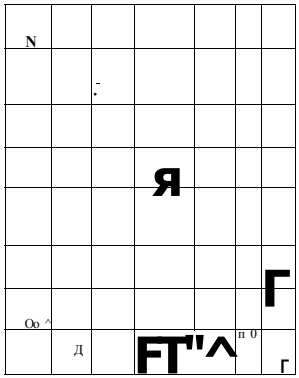


Рис. 22.202. Зависимости холловской подвижности дырок и удельного сопротивления от концентрации дырок в пленках GeTe с различным содержанием Те: О – 54% (неотожженный образец); остальные символы – 51,5% (после нескольких процессов отжига) [303]

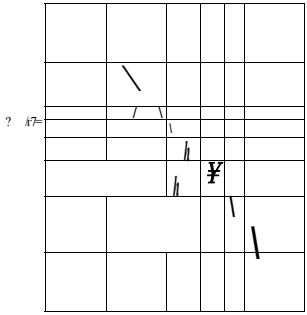


Рис. 22.204. Зависимости холловской подвижности дырок при температурах 77 (О) и 300 К (А) и отношения коэффициентов Холла для тех же температур от концентрации дырок в кристаллических пленках GeTe, полученных осаждением на подложках с различной температурой [304]. Значения /?„ (300 К) для различных пленок различаются; для объемных поликристаллических образцов (300 К) = 6,5-Ю-з см^/Кл

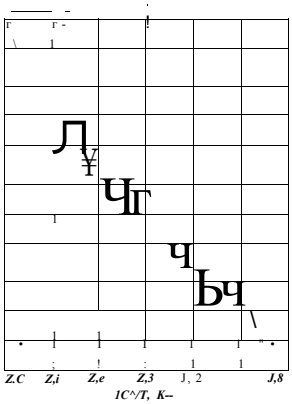


Рис. 22.205. Температурная зависимость проводимости монокристалла SnS [305]

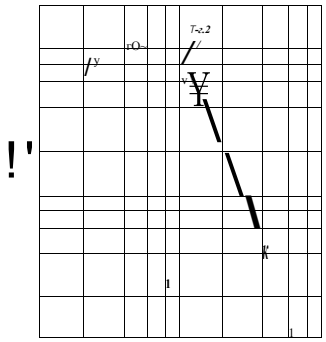


Рис. 22.206. Температурная завненмость холловской подвижности дырок в SnS поперек оси с [306J



Рис. 22.207. Температурная зависимость концентрации цырок в SnS [306]

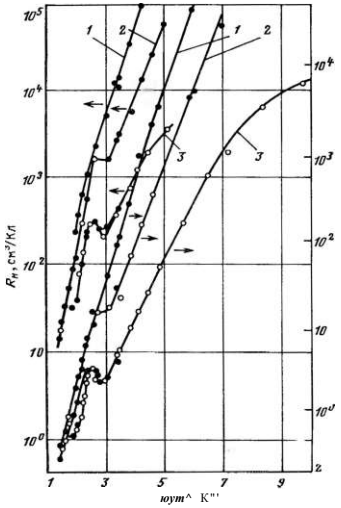


Рис. 22.208 Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла в кристаллах n-SnSe после выращивания отжига (2) и закалки (5) 1307]

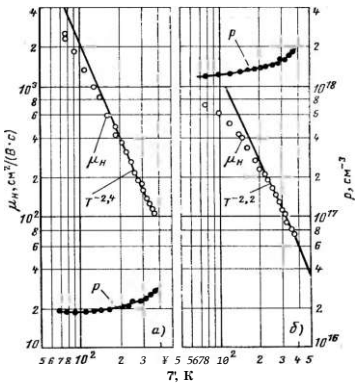


Рис. 22.209. Температурные зависимости подвижности дырок вдоль оси [001] и концентрации дырок в кристаллах SnSo с низкой (а) и высокой (б) концентрацией дырок [308]

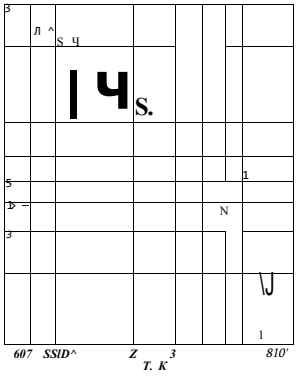


Рис. 22.212. Температурная зависимость проводимости различных кристаллов SnTe [309]: концентрация дырок при Г-77 К, 10" см-': V – 2: А –3,48; Л-8,05; О-18,8; т-\7.е

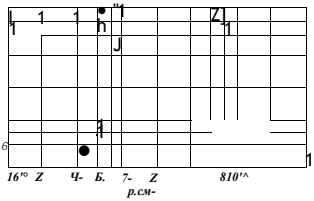


Рис. 22.210. Зависимость холловской подвижности дырок вдоль оси [001] при Г = 77 К от их ко"центрации в SnSe после выращивания (О) и отжига (#) [308]

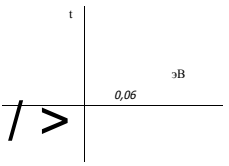


Рис. 22.211. Зонная структура SnTe вблизи точки *L* зоны Бриллюэна [294]

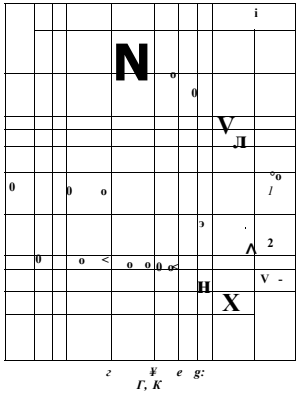


Рис. 22.213. Температурная зависимость холловсиой подвижности дырок в различных кристаллах SnTe [310): концентрация дырок при Г-4.2 к. 1-1.4: 2-7,73; 3-1.74

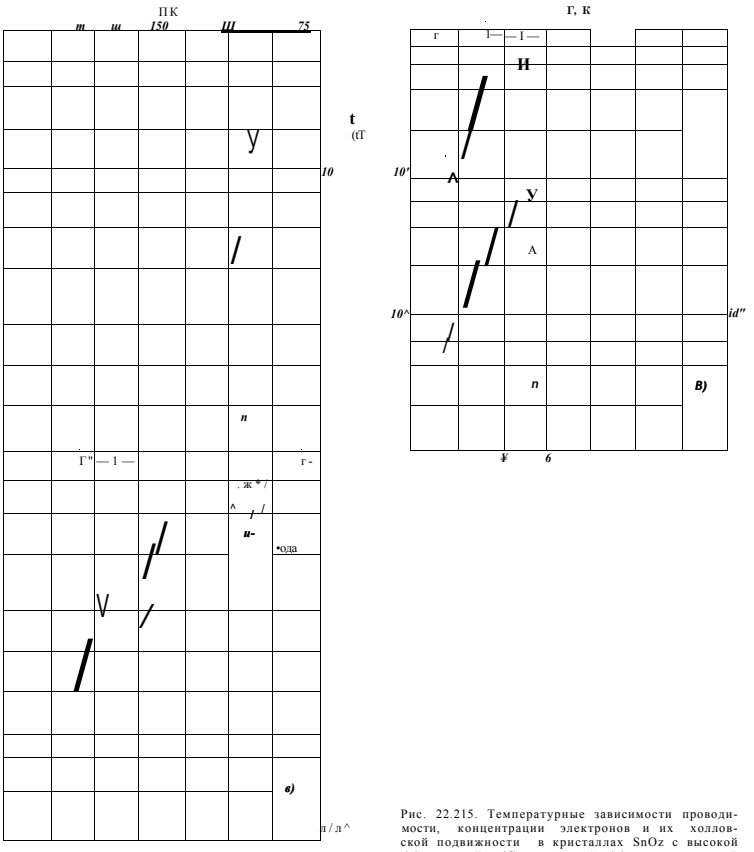


Рис. 22.215. Температурные зависимости проводимости, концентрации электронов и их холловской подвижности в кристаллах SnOz с высокой (а), средней (б) и низкой (в) концентрацией электронов [311]

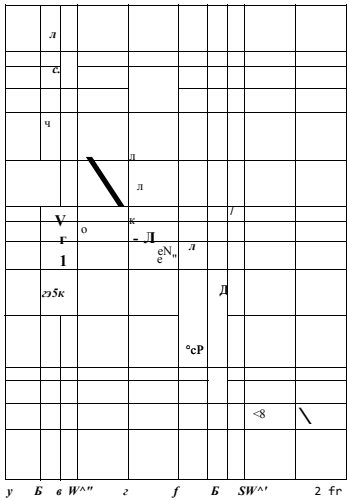


Рис. 22.214. Зависимость холловской подвижности дырок при различной температуре от их концентрации при Г=77 К для кристаллов SnTe [309, 310]

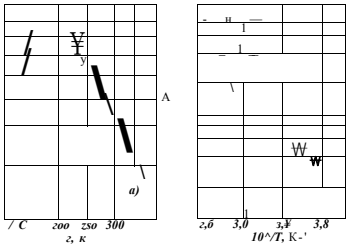


Рис. 22.217. Температурная зависимость холловской подвижности электронов поперек *(а)* и вдоль (б) оси с в SnS2 [312]

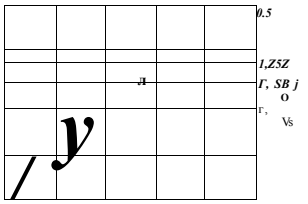


Рис. 22.218. Температурная зависимость удельного сопротивления (проводимости) поперек оси с для кристалла SnSe2 с концентрацией электронов п=1,57-10" см-' при Г=290 К [36]

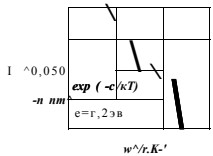


Рис. 22.219. Температурные зависимости подвижности электронов в 'базисной плоскости (а) и перпендикулярном ей направлении (б) в кристалле SnSes [270]

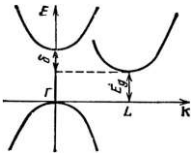


Рис. 22.216. Зонная структура SnSs, SnSej [294]: **6. эВ: SnSs —0,8; SnSe^ — 0.65**

22.3.5. Соединения типа A^B^—A^B^'^

Известно полупроводниковое соединение Sbl типа ^vfivii^ кристаллизующееся в гексагональной решетке (а=0.748 им, с=2,09 нм. £g=2,5 эВ [242]).

Таблица 22.24. Электрофизические свойства сплавов Bi^j^-Sb^t- [293]

Кристаллическая структура			*Eg.* эВ		см^/Гвс)	*v-p* CMV(Bc)	(4,2 К)
Система							
Ромбоэдр.	0,474—0,450 (*a,* ж = 0-Н 1)- 1,186—1,154 (с, л:==0--0,5)	128,5 (л: = 0.1)	6-10-3 (л: = 0,06) 8-10-3 (ж = 0,068)	0,025 (mi, л:= 0.05) 0,75 (*m.2,* х=0.05) 0,0065 (тз, ж=0,05)	3,97-10« (х = 0,03)	4,73-10« (* = 0,03)	360 (л:=0,072) 175 (л:=0,092)

Таблица 22.25. Полупроводниковые соединения B^

	Кристаллическая структура			^ПЛ. к	*SEgldT,* Ш-" эВ/К		
As,S3	Моноклин. , Cfft	1,147 (а); 0,957 (Ь); 0,424 (с) [1]	3,43 [123J	598 [123]	2.5 123 2.6 [294	- 5 , 6 [10]	
As^Seg	То же	1,205 *(а);* 0,989 (Ь); 0,428 (с)	288]	4,75 [216]	633 [216]	1.8 [114 1,85 [294] 1.9 [107	
	» »	1,44 (а); 0,992 (Ь); 0,405 (с) [1J	6,1 [123]		635 [116]	0,5 [288 1.0 [123	0,36 {man) [15]
Sb^Ss	Орторомб., ВЦ	1 ,12 (а); 1,128 (6); 0,386 *(с)* [1]	4,64 [123]	819 [116]	**1,62 [12]** 1,72 [114] 1,88 [294]	—9'**[294]**^^	
Sb,Se3	То же	1,158 (с); 1,168 (Ь); 0,398 (с) [1]	5.81 [123]	885 [116]	1.1 [294 1.2 [123	—5,5 [294]	**2,2 [288]**
Sb^Tej	Триг.,	1,043 (й); а = 23°23' [294]	6,5 6,57	895 [118]	0,19 [48] 0,22 [29	- 1 [288]	0,37 {man) [15]
BiA	Орторомб., ПЦ	1,113 (а); 1,127 *(Ь);* 0,397 (с) [1]	6,73 **6,81**	1036 [294] 1123 [116]	1,25 [16] 1.3 [116	- **8 [288]**	
Bi,Se	Триг., Dfrf	0,984 (а); а=24°24' [132]	7.40 7,68	979 [116]	0.16 [29-3 **0.2 [288]**	- 2 **[168]**	0,02 (OTj^)
Bi,Te3	То же	1.048 (а); а=24°9'	7,86 [117]	853 [116]	0,13 [117] 0,16 [45]	-0,95 [117 —1,5 [294]	0,13 (/П||)[294]
	Геке., **D**L	**O!7I8** (а); 2,28(с) **[288]**	8,4 [288]	880 [123]	0,4 [123]		0,32 (/?i^„)[1231

Продолжение табл. 22.25

		cMV(B-c)		^c» 1294]	[294]	
AsA		~ 1 [294]		5.7—8,8 7,5 [184]	5,9—12 9,7 [184]	590 [288]
As^Seg		20-80 [294]	^10 [288]	8.8-10,5 6,0 [184]	12,4-13,9 8,9 [184]	418 [288]
Asjeg SbA	*0,Ъ{тарIIIЦ*	170 [15] 15 [115]		7,2 (Гс) 9,5 (lie)	180 (I! *с)* 15 (X *с)*	**260 [288]** 310 [132]
Sb,Se3	1,4 [288]	75 [16]	45 [16]	13,7 (i_ *с)* 15,1 (Iie)	120 (II с)	240 [132]
5b,Tez	0,3 [294] 0,34 (m^p) [15]	200 [123]	400 [44]	32,5 (X *с)* 51 (lie) 13 (II с)	168 (_. с) 36,5 (II с) 38 (X *с)* 120 (II с)	160 [132] 435 [288]
BbSes	0,12 [294]	600-2000 [114] *{о. Т-Ч')*	10 000 (4,2 К) [294;	29 (i ?)	113 (*с)* 100 [288]	180 [132]
Bijeg	0,24 [123] 0,35 (m^p) [294]	1200 [13]	40 600 [294] [13]	50 (II *с)* 85 (X *с)*	360 [288]	165 [294]
BiSe		20 [288]				

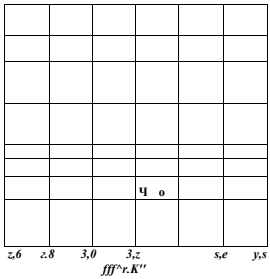


Рис. 22.220. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок (поперек слоев) в двух кристаллах AS2S3 [2681:
в кристалле *2* – большая, чем в кристалле *1.* концентрация ловушек

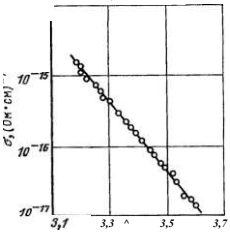


Рис. 22.221. Температурная зависимость проводимости (поперек слоев) для AsjSes [261]

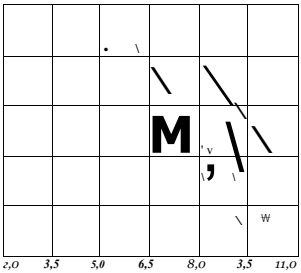


Рис. 22.222. Температурные зависимости дрейфовой подвижности электронов (поперек слоев) в различных кристаллах AzrSez [261]:
отношение концентрации ловушек к эффек-• ой плотности состояний в зоне проводимости: О – 10-=; 2-10-^ ф – 9.10-5; Д-3-Ю-'

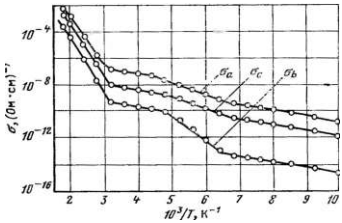


Рис. 22.223. Температурные зависимости проводимости SbaSs вдоль осей ***a, b, c*** [258]

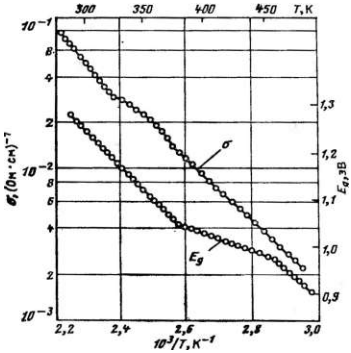
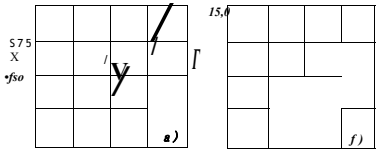


Рис. 22.224. Температурные зависимости проводимости (вдоль оси с) и ширины запрещенной зоны ЗЬгЗез [248]



7-,К

Рис. 22.225. Температурная зависимость удельного сопротивления (а) вдоль (рзз) и поперек (ри) оси ***c*** и коэффициентов Холла ***(б)*** в геометрии /||с±б ***(Rm)*** и ***ILc\\B*** (/?,2з) для SbsTes [206]

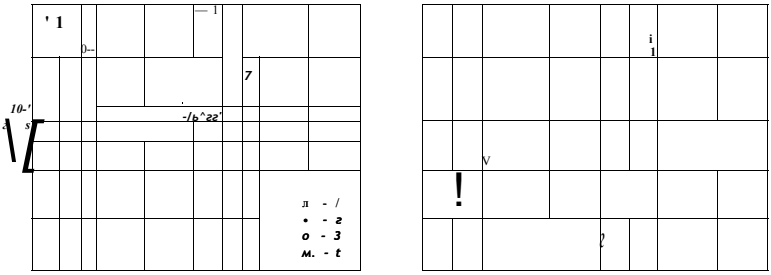


Рис. 22.226. Температурные зависимости удельного сопротив.пения (поперек оси с) кристаллов n-B125ез ^a) и p-B],5ez *(б)* [203]:
концентрация носителей растет от / к 4

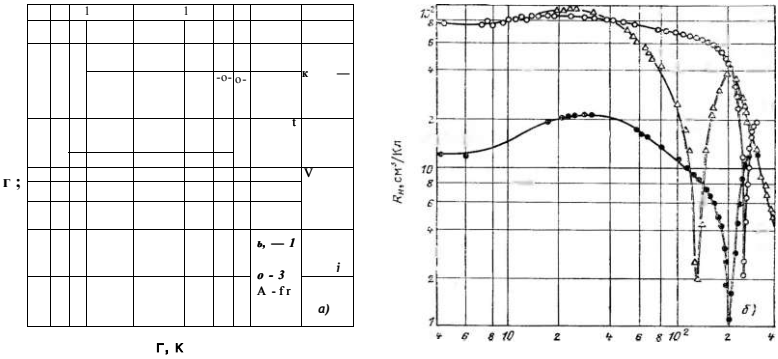


Рис. 22.227. Температурные зависимости коэффициента Холла в геометрии *Iпс±В ддя* кристаллов n-Bi2Se3 (а) и p-BizSes (б) [203]:
кристаллы те же, что на рис. 22.226

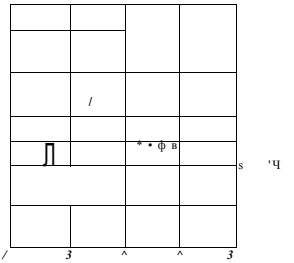


Рис. 22.228. Температурные зависимости удельного сопротивления (поперек оси с) и коэффициента Холла в геометрии / || с ± f i для n-Bi2Se3 в области собственной проводимости [203]

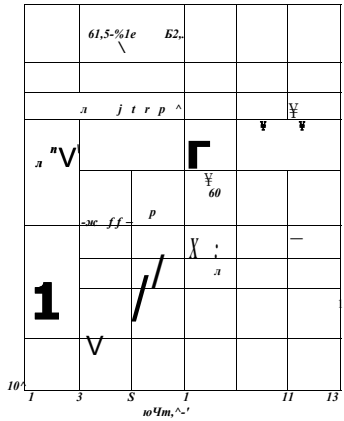


Рис. 22.230. Температурные зависимости проводимости (поперек оси с) для кристаллов BijTes n- и p-типа [203]: числа у кривых — атомное содержание Те, %

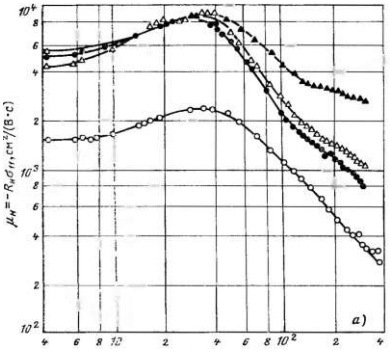
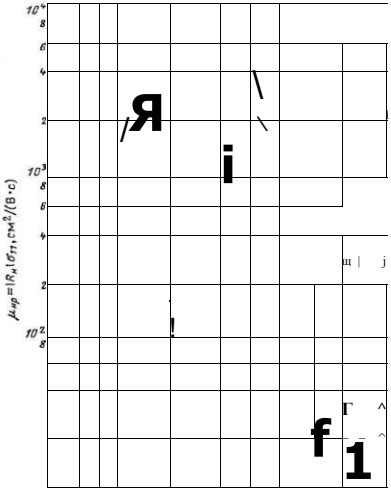


Рис. 22.229. Температурные зависимости холловской ПОДВИЖНОСТИ электронов (а) и дырок *(б)* в кристаллах R-BisScs *(а)* и p-BisSes (б) [203]: концентрация носителей 10" см-': 0 — 1,6 (о); 0,69 (б); ф — *1.2 (а);* 5,4 (б); Д — 0.87 (о); 6,7 (б); ^ — 5 , 4 (а); 0,72 (б)



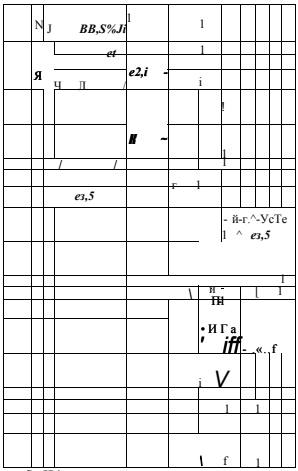


Рис. 22.231. Температурная зависимость холловской подвижности носителей поперек оси *с* в кристаллах n-BijIes (пунктирные линии) и p-BijTes (сплошные линии) [128]:
числа у кривых — атомное содержание Те, %

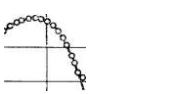


Рис. 22.232. Температурные завис.'мости 'Ффицкента Холла для Bi2Te3 в геометрии /J_cl|S « и */IcJLB* (О) [174]

22.3.6. Соединения типа ^vifiiv—^lviBvi

Известно полупроводниковое соединение типа p-CrSiaC очень малой подвижностью дырок (££=1,3 эВ **[16])**

Таблица 22.26. **Полупроводниковые соединения** Л^'В^

Соединение	Кристаллическая структура		Eg., эВ	p-p, cmV(B-C)
	Система, группа			
CrOз	Куб., с'®	0,5743 (й); 0,8557 ф); 0,4789 (с) [242]	1,4 [242]	-
СгА	Геке., Dh	0,4954 (й); 0,13584 (с) [242]	1,59-1,63 [2421	-
CrTer	—		0,17 [16]	12 (|x„|) (70)
M0S2	Геке., Dl^	0,315 (а); 0,1230 (с) [1]	1,2 [10]	200-300 ([Xp) [249]
TeOr		0,479 (aj; 0,377 (с) [1]	1,5 [10]	-

(блица *22.27.* Электрофизические свойства сплавов Sej,.Tei_jj. [293]

Кристаллическая структура		р, г/смз				(1it). CMV(B-C)	v-p (IK). CM^/(B.CJ
01С-							
Триг.	. ^ о - п 0,446—0,438 (й) 0,593-0,492 (С)	6,2(д:=0,05) 5,01 (х=0,9)	0,36(х=0,0!С) 0,2(х=0,55) 0,4(л:=0,85)	0,17(х=0,05) 0,22 (ж=ОЛ)		ЮООО *(х=0,1)*	1000(Х=0,1) 350(х=0,2) 17 (Jt;=0,5) 48(х=0,8)

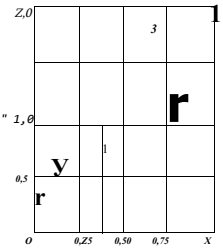
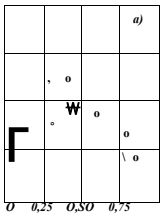
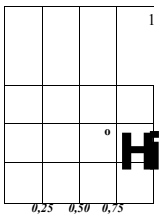


Рис. 22.233. Зависимость ширины запрещенной зоны Eg 3 Se, Te,-^ от л: [111]:
/ — собственная проводимость; 2 — фотопроводимость; 3 — температурная зависимость проводимости



Риг. 22.234. 3 SejtTei-,: от хи; и подвижности Д1 определен
Д — По магнетосоп!



В Se, азлич концентрации дырок в мерению термо-ЭДС [87] (а) ei-л. от X при Г = 300 К (о), [ми методами [111]:
J — по термо-ЭДС: 0 — по эф- Холла

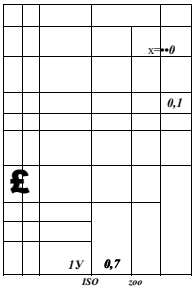


Рис. 22.235. Температурная зависимость подвижности дырок в *Se^* Te,-;, в направлении оси *с* при различных значениях д: (из данных по измерению магнетосопротивления) [87]

22.3.7. Соединения типа Л^'В"'—

Известны полупроводниковые соединения MnAlз типа ^viifiiii (£g=0,45н-0,58эВ, $p_{\text{ш}}$ > 200 см2/(В-с), Цр~ -200 см2/(В.с) [242]) и ReSi^ типа А^^^В^^ (£g= =0,13 эВ [16]) и MnSi, кристаллизующееся в кубической решетке (й=0,456 нм, £g=0,5-J-0,6 эВ, Цр= 104-40 см^/ /(В.с) [242]).

Таблица 22.28. Полупроводниковые соединения *А В*

Соединение	Кристаллическая структура		р. г/см^-	'"пл. к		к	*Eg^* эВ
	Система	*а, Ъ, с.* нм					
MnS	Куб.	0,522	3,83	1S90		150	
MnSe	То же	0,545	5,35	1780	360	150	0,7
MnTe*2	Гекс.	0,415 (а); 0,671 *(с)*		1470	160	310	1.3
MnS,	Куб., Г"	0,610		677		48	
MnSea	То же	0,643		863		75	0,15
MnTer	То же	0,695	–	1010	–	84	0,01-0,04
MnO"	Ромб.	0,927 (а); 0,287 (&); 0,453 (с)	—	—	—	92	0,13-0,19

" Все соединения, приведенные в табл. 22.28, – антиферромагнетики. – температура Нееля.
m /т„ –0,25 (1 с) и 0.47; 1 см^(В-с) [106].
1,2 CMV(B C) [242].

22.3.8. Соединения типа *А^* iiiBv_^VIiibv)

Соединения типа изучены слабо. Зона проводимости PtSbs —восемь эллипсоидов вращения, большие оси которых направлены вдоль [111]. Валентная зона — шесть эллипсоидов вращения, расположенных вдоль осей [100] [41]. Энергия прямого перехода £„=0,4 эВ. Cg соответствует непрямому переходу [175],

Таблица 22.29. Полупроводниковые соединения Л

	Кристаллическая структура			E^, эВ	m_n/m_n	mp/m.	см-/(В-с)
	система, группа	*Ь. с.* нм					
CoSba	Орторомб.	0,321 (а); 0,578 (Ь); 0,642 (с) [1]		0,2 [16]			300 [16]
CoSbs	Куб., Т1	0,9034 [242] 0,9936 [242]	1131 [249]	0,5 [16. 2491			
PtSbj	Куб.,	0,643 [1]	1503 [41]	0,08 [41] 0,1 [288]	0,42—0,54 [41] 1,4 [41]	0,57-0,72 (-Пй) [41] 0,168 (-л Ⅱ) [175] 0 , 0 9 8 [1 7 5] 0,06 (.-nj^^) 1175]	[288]

'ni = 1,32.10" Г^^^exp (0,11 sB/2 *кТ)*

Таблица 22.J Полупроводниковые соединения *А*

Соединение	Кристаллическая структура		'•пл, К		CMV(B-C)
	Система, группа				
FeA	Ромбоэдр.	0,5427 [242]	1500 [242] 1838 [16]	1,6 [16] 2,2 [242]	-
FeSa	Куб.. Т1	0,5405 [242]	962 [249]	1,25 [16]	200 [16]
Pes,	Ромб., D11	0,358 (а); 0,479 (6); 0,572 (с) [1]	1183*1 [16]	0,95 [16]	-
PcTfir	То же	0,385 (а): 0,534 (6): 0,626 (с) [1]	1015*1 [16]	0,46 [16]	1 [51]
NiO*2	Куб., 0|	0,418 [1]	3170 [42]	3,7*3 [95]	0,2 [25] 0,1 [95]

порядком
Соответствуе!? не ширине запрещенной зоны, а электронному переходу 3d —• 4s. ширина запрещенной шы значительно больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Landoit-Bornstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomic, Geophysik, Technik. Berlin: J. Springer. 1955. Bd. 1, S. 4.

2. Wickoff R. W. G. Crystal! Structures N. Y.: Interscience Publ. 1953,

3. Харциев В. Е.//Физика твердого тела. 1662. Т. 4. С. 433—436.

4. Horn F. H.//Boron/Ed.: Kohn J. A., Nye W. F., Ganle C. K., N. Y. Plenum Press. 1960. Vol. 1. P. 111-118.

5. Голикова О. Д., Соловьев Н. Е., Угай Я. А., Фейгельман В. А.//Физ. и техн. полупроводников. 1979. Т. 13. С. 825—827.

6. Golikova O. A.//J. Less-Common Met. 1982. Vol. 82. P. 362—366.

7. Голикова О. А., Жубанов М. Ж.. Климашин Г. Н.// Физ. и техн. полупроводников. 1968. Т. 2. С. 548—551.

8. AsanabSe S.//J. Phys. Soc. Jap. 1960. Vol. 15. P. 989—995.

9. Harbeke G., Tosatti E.//Proc. 12 Intern. Conf. Phys. Sem. Stuttgart 1974. P. 626—629.

10. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1962.

11. Смит Р. Полупроводники: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1962.

12. Ybuki I./7J. Phys. Soc. Jap. 1955. Vol. 10. P. 549—563.

13. Drabble G.//J. Phys. Soc. 1956 Vol. B69. P. 1101—1140. 1958. Vol. B72. P. 380—387.

14. Golikova O. A., Subanov M. Z.//Boron/Ed. Niemyski T. Warsaw. Pol. Sci. Publ. 1970. Vol. 3. P. 269—273.

15. Rodot **M**.//Phys. Stat. Sol. 1963. Vol. 3. P. 10—13.

16. Угай Я. А. Введение в химию полупроводников. М.: Высшая школа. 1965.

17. Warschauer D.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 1853—1858.

18. Кот М. В., Крецу Л. В.// Изв. АН СССР Сер. физ. 1964. Т. 281. С. 259—299.

19. Mort J.//Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 18. P. 540-547.

20. Caywood **J.** M., Mead C. A.//J. Phys. Chem. Sol. 1970. Vol. 31. P. 983—985.

21. Hopfield J. J., Thomas D. G.//Phys. Rev. 1961 Vol. 122. P. 35—38.

22. Dimmock **J.** O., Wheeler **R. J**.//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 2271—2277.

23. Noguet P. C.//J. Phys. 1965. Vol. 26. P. 317—323.

24. Lavine C. **P.,** Ewald A. W.//J. Phys. Chem. Sol 1971. Vol. 32. P. 1121—2123.

25. Богомолов В. Н., Кудинов Е. К., Фирсов Е. А.// Физика твердого тела. 1967. Т. 9. С. 3175—3191.

26. Prener I., Woodbury H. H.//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris. 1964. P. 1231—1236.

27. Хилсум К., Роуз-Инс А. Полупроводники типа дш^у. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.

28. Мосс Т. Оптические свойства полупроводников: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1961.

29. **Бреслер М. С, Редьке Н. А**.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1972. Т. 34. С. 149—154.

30. Grosse **P.** Springer Tracts in Modern Phys.//Ed.: G. Hohler. Berlin—Heidelberg—N Y.: J. Springer. 1969 Vol. 48.

31. Грамацкий В. И., Мушинский В. П.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т. 28. С. 1077—1087.

32. Ахундов А., Абдуллаев Г. Б., Гуссейнов Г. Д./, Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris 1964. P. 1277-1282.

33. Veric C. New Develop. Semiconductors. Leyden, 1973. P. 524—519.

34. Мирзабаев М., Тучкевич В. М., Шмарцев Ю. В./, Изв. АН СССР. Сер. физ. 1964 Т. 28. С. 1300—1309.

35. Парфеньев Р. В., Погарский А. М., Фарбштейн И. И.//Физика твердого тела. 1963. Т. 4. С. 2630—2637.

36. Evans R. L., Hazelwood R. A.//P. Phys. D. 1969 Vol. 2. P. 1507—1512.

37. Gibbons Dy., Spear W. E.//J. Phys. Chem. Sol. 1966. Vol. 27. P. 1917—1923.

38. Fuldner **J.** e. a.//Proc. XI Conf. Phys. Semicond., Warsawa, 1972. P. 351—357.

39. Nitzki **v.,** Stossel W.//Phys. Stat. Sol. 1970. 39(b). P. 309—313.

40. Rodot M.//Compt. Rend. Acad. Sci. 1965. Vol. 260. P. 1908—1911.

41. Emtage **P.** R.//Phys. Rev. 1965. Vol. 138. P. 24-311.

42. Botling **J.** F.//J. Chem. Phys. 1960. Vol. 33. P. 305—311.

43. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам/Под ред. Н. Н. Горюнова. М.: Энергия. 1972.

44. Von Liebe L.//Ann. Phys. 1965. Bd. 7, № 15. S. 179—183.

45. Salzer O., Nieke H.//Ann. Phys, 1965. Bd. 7. S. 192—198.

46. Onuki//J. Phys. Soc. Jap. 1965. Vol. 20. P 171-177.

47. Кот М. В., Панасюк Л. М., Симашкевич А. В., Цуркан А. Е.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 1242-1243.

48. Yaschke R.//Ann. Phys. 1965. Bd. 7. № 15. S. 106-109.

49. Ломакина Г. А.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 600—608.

50. Komiga H.//Phys. Rev. 1964. Vol 133. P. A1679-A1682.

51. Suchet **J**.//Compt. Rend. Acad. Sci. 1964. Vol. 259. P. 3219—3262.

52. Rosenman M. **J**.//Ibid. 1964. Vol. 259. J. 2621-2622.

53. Adams A. R., Speaj W. E.//J. Phys. Chem. Sol. 1964. Vol. 25. P. 1113—1118.

54. Hacke **J**.//J Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 2484-2487.

55. Redin A. D.//Phys. Rev. 1958. VoL 109. P. 1916-1919.

56. Rodot JVl.//Compt. rend. Acad. Sci. 1964. Vol. 258. P. 5414-,5418

57. Jeavons A. P., Sannders Y. A.//Phys. Roy. Soc. 1969. Vol. A310. P. 415—421.

58. Bludau W., Ontcn A., He'nke W.//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 1846—1852.

59. Dunstadter H.//Z. Phys. 1954. Bd. 137. S. 383-**388.**

60. Вольфштейн S. Л1, Фистуль В. И.//Электроника и ее применение. Сер. Итоги науки и техники. М.: Нзд. ВИНИТИ АН СССР, 1979. Т. 4.

61 Соммер А Х. Фотоэмиссионные материалы: Пер. с англ. М.: Мир. 1972.

62. Физические свойства халькогенидов — редкоземельных члементов/Под ред. В. П. Жузе. Л.: Наука. 1973.

63. Irvin **J.** CV/Bell Syst. Tech. J. 1962. Vol. 41. P. 387-393.

64. Jacoboni C., Canali C.„ Ottaviani G., AJberigi Quaranta A.//Sond. Stat. Electron. 1977. Vol. 20. P. 77—81.

65. McLean T. P.//Progress in Semiconductors/Ed. A. F. Gibson. Lond.: Heywood. 1960. Vol. 5.

66. Park V. S.//Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 512—515.

67. Lett S. A., Synch D. W.//Phys. Rev. 1966. Vol. 141. P. 681-688.

68. Camassel J., Auvergne D., Matthieu H. e. a.//SoI. Stat. Comm. 1973. Vol. 13. P. 63—68.

69. Marby J. A./7Phys. Rev. 1965. Vol. 140. P. 304—312.

70. Arumi Z., Mancu P.//Rend. Semin. Fac. Sci. Univ. Cagliari, 1963. Vol. 33, ЛЬ 3—4. P. 26—29.

71. Morin F. J.//Phys. Rev. 1954. Vol. 93. P. 62—69.

72. Prince JW. B.//Ibid. 1953. Vol. 92. P. 681—688

73. Голикова О. А., Мойжес Б. Я., Стильбаис Л. С.// Физика твердого тела 1961. Т. 3. С. 3105—3109.

74. Logan R. A., Roweli J. JVl, Trumbore F. A.//Phys. Rev. 1964. Vol. 136A. P. 1751—1763.

75. Wliitaker J.//SoI. Stat e Electron. 1965. Vol. 8. P. 649-652.

76. Braunstein R., ***Moore A.*** R.. Herman F.//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 695—703.

77. Zdanowich W., Wojkowski A.//Phys. Stat. Sol. 1965. Vol. 8. P. 569—574.

78. Douglas R.//J. Phys. Chem. Sol. 1965. Vol. 21. P. 329-334.

79. Richard D.//Ibid. 1965. Vol. 26. P. 439—443.

80. Busch G., Vogt 0.//Helv. Phys. Acta. 1-960. Vol. 33. P. 437 -447.

81. Woolen J., Condas Y. A.//Phys. Rev. 1963. Vol. 131. P. 657—662.

82. Tamura H., JVlasumi T.//SoI. Stat. Commun. 1973. Vol. 12. P. 1183—1185.

83. Hall R. F., Wright H. **C**;.//Brit. J. Appl. Phys. 1967. Vol. 18. P. 33—38.

84. Цидильковский П. ***Г.Л.*** Электроны и дырки в полупроводниках. М.: Наука. 1972.

85. Орлова Н. Й., Шишкин П. Т.//Изв. АН СССР. Сер. физ.-мат. 1964. Л» 4. С. 53—59.

86. Winker H.//Helv. Phys. Acta. 1955. Vol. 28. P. 633—639.

87. Men H.. Stuke J.//Phys. Stat. Sol. 1971. Vol. 45. P. 163—167.

88. Сорокин Г. П.//11313. вузов. Сер. физ. 1965. N» 4.. С. 140—144.

89. Wa!!is Y "Ann. Phys. 1956. Vol. 17. P. 401—403.

90. Pollack Y. P., Trivich D.//J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. P. 163—165.

91. Okamoto K., Kawai S.//Jap. J. Appl. Phys. 1973. Vol. 12. P. 1130—1138.

92. Еоскаиян А. А., Инглизян П. Н., Лалыкин С. П.// Физ. и техн. полупроводников. 1978. Т. 12. С. 2096—2099.

93. Горбачев В. В., Путилин И. JVl.//Phys. Stat. SoL (a). 1973. Vol. 16. P. 553—559.

94. Сорокин Г. П., Пеншев Ю. М., Оуш П. Т.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 2244—2245.

95. Ксендзов Я. М., Драбкин И. А. Там же. 1965. Т. 7. С. 1884—1887.

96. Fortin E., Weichman F. L.//Phys. Stat. Sol. 1964. Vol. 5. P. 515—519.

97. Junod P. e. a.//Phil. Mag. 1977. Vol. 36. P. 941—952.

98. Алиев С. А., Суюнов У. Х., Араслы Д. Г., Алиев JW. И.//Физ. и техн. полупроводников 1973. Т. 7. С. 1086- 1091.

99. Aulich E., Brebner J. L., Mooser E.//Phys. Stat. Sol. 1969. Vol. 31. P. 129—137.

100. Угай Я. А., Завальский Ю. П., Угай В. Д.//Докл. АН СССР. 1965. Т. 163. С. 663—666.

101. Junod P.//Helv. Phys. Acta. 1959. Vol. 32. P. 567, 601—604.

102. Davlen **V.** R. JVl.//Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 666—669.

103. Komiga H.//Ibid. 1964. Vol. A133. P. 679—687.

104. Minder R., Ottaviani G., Canali C.//J. Phys. Chem. Sol. 1976. Vol. 37. P. 417—424.

105. Lectin J., Barbaste R., Askenazy S. e. a.//Sol. Stat. Commun 1974. Vol. 15. P. 693—699.

106. Wassher J. D., Seuter R. M. J., Haas C.//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris. 1964. P. 1269—1275,

107. Коломиец Б. Т., Лебедев Е. А., Мазек Ф. Т. и др. —Ibid P. 1283—1286.

108. Wood e., Harrap C.. Kane W. M.//Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 978—983.

109. Masumi T., Ahrenkiei R. K., Brown F. C.//Phys. Stat. Sol. 1965. Vol. 11. P. 163—167.

110. Ponpon L. P.//1EEE Trans. Nucl. Sci. 1975. Vol. S—22. P. 182—186.

111. Beyer W., Mel! H., Stuke J.//Phys. Stat. Sol. (b). 1971. Vol. 45. P. 153—162.

112. Krevs V. E., Lutsiv R. V., Pashovskii M. B., R:t-rov p. p./71bid. 1974. Vol. 65. P. K43—K45.

113. Hanson R. C.//J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66. P. 2376—2383.

114. Абрикосов Н. Х. и Др. Полупроводниковые соединения, их получение и свойства. М.: Наука. 1967.

115. Reimherr A.//General Survey of the Semiconductor Field. National Bureau of Standarts. Technical Note. 1962. P. 153—157.
116. Полупроводники/под ред. Н. Б. Хенней: Пер. с англ. и нем. М.; Изд-во иностр. лит. 1962.
117. Материалы, используемые в полупроводниковых приборах/Под ред. К. Хоггарта: Пер. с англ. М.: Мир.
118. Thermophysical Properties of High Temperature SoJid Materials. Purdue Univer. 1967.
119. Burnham D. C., Brown F. C, Knox R. S.//Phys. Rev. 1960. Vol. 119. P. 1560—1568.
120. Ahrenkiel R. K.//Phys. Rev. 1969. Vol. 18. P. 180—188.
121. Горюнова Н. А. Сложные алмазоподобные полупроводники. М.; Советское радио. 1968
122. Wagrur R. **J.,** Ewald K. A.//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32. P. 697—673.
123. Родо М. Полупроводниковые материалы: Пер. с франц. М.: Металлургия. 1971.
124. Добролеж С. А. Карбид кремния. Киев: Гос. изд-во техн. лит. УССР. 1963.
125. Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца. — М.: Наука. 1968.
126 Коломиец Н. В., Лев Е. Я., Сысоева Л. М.//Физика твердого тела. 1963. Т. 5. С. 2871 -2878.
127. Albers W. e. a. 13. App!. Phys. Suppl. 1961. Vol. 32. P. 2220—2231.
128. Champness C. H., Kipling A. L.//Can. J. Phys. 1966. V. 44. P, 769—773.
129. Соболев В. В.//Физика твердого тела. 1970. Т. 12. С. 2687—2693.
130. Cuhen M. L., Au-Yang M. T.//Phys. Rev. 1969. Vol. 178. P. 1358—1362.
131. Wfnkler H.//Helv Phys. Acta. 1955. Vol. 28. P. 663—669
132. Agrain P., Balkansky M. Table de constante des Semiconducteurs. Paris: Pergamon Press, 1961.
133. Turner W. **J.,** Fisher A. S., Reese W. E.//J. Appl. Phys. 1961. Suppl. Vol. 32. P. 2241—2249.
134. Heller M. W. Damelson Y. C.//J. Phys. Chem. Sol. 1962. Vol. 23. P. 601 608
135. Redin R. D., Morris R. G., Danielson G. C.//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 1916—1920.
136 Li P. W., Lee S. N.. Danielson G. C.//Ibid. 1972. Vol. B6. P. 442- 453.
137. Grossman L. D., Danielson G. C.//Ibid. 1968. Vol. 171. P. 867—872.
138. Физика и химия соединений типа Л^В^ь Пер. с англ./Под ред. А. С. Медведева. М.; Мир. 1970.
139 Hamilton P. H.//Semicond. Proc. Sol. Stat. Technol. 1964. Vol. 7, Ло 6. P. 15—19.
140 Belts D. D.//Canad. J. Phys. 1961. Vol. 39. P. 223—231.
141 Robic R A., Edwards J. L.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2659—2673.
142 Rode D. L.//Phys. Rev. 1970. Vol. B2. P. 4036—4043
143. Милославский В. К., Шкляревский О. Н.//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 926—929.
144 Watanabe H., Wada H., Takahashi T.//Jap. J. .4ppl. Phys. 1964. Vol. 3. P. 617—621.
145. Полупроводники с узкой запрещенной зоной и их применение: Пер. с англ. М.: Мир. 1969.
146. Umeda **J.**//J. Phys. Soc. Jap. 1964. Vol 19. P. 2052—2058.
147. Geik R., Hakel W. **J.,** Perry C. H.//Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 824—827.
148. Balkansky M., Zellag B. A. M., Longen D.//J. Phys. Chem. 1966. Vol. 27. P. 299—304.
149. Segall B., Lorenz M., Woodbury H.//Phys. Rev. 1963. Vol. 129. P. 2471—2477.
150. Медведева З. С. Халькогениды элементов III Б подгруппы периодической системы. М.: Наука. 1968.
151. Tagiev B. F.//Phys. Stat. Sol. (a). 1970. Vol. 3. P. K119—K120.
152. Catsuyama C, Watanabe Y., Hamaguchi C. e. a.// J. Phys. Soc. Jap. 1970. Vol. 29. P. 150—155.
153. Aven M.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 1204-1207.
154. Park Y. S., Hemenger P. M., Chung C. H.//App!. Phys. Lett. 1971. Vol. 18. P. 45—49.
155. Reignold D. G., Litton C. W., Collins T.//Phvs. Rev. 1965. Vol. 146. P. 1726—1729.
156. Seller D. G., Oalazka R. R., Becher W. M.//Ibid. 1971. Vol. B3. P. 4274—4288.
157. Баширов Р. И., Таджиев Р. М.//Физика твердого тела. 1970. Т. 4. С. 1936 -1943.
158. Bush G., Moldanova M.//Helv. Phys. Acta. 1962. Vol. 35. P. 500—508.
159. Dietz R. F., Hopfield J. J., Thomas D. G.//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 2282—2289.
160. Pigon K.//He!v. Phys. Acta. 1968. Vol. 41. P. 1104—1109.
161. Fisher P., Fan H.//Bu!!. Amer. Phvs. Soc. 1959. Vol. 4. P. 409—415.
162. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз. 1963.
163. Zdanowicz W., Kenkie Z.//Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Sci. Chem. 1964. Vol. 12. P. 729—734.
164. Fingold L.//Phys. Rev Lett. 1964. Vol. 13. P. 233—238.
165. Шевченко В. Я.//Журн. неорганические материалы. 1975. Т. 11. С. 1719—1726.
166. Zdanowicz W., Wielzak B., Zdanowicz P.//Acta Phys Polon. 1975. Vol. A48. P. 27—31.
167. Turner W. C., Fischler A. S., Reese W. G.//Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 759—767.
168. Black **J**.//Phys. Chem. Sol. 1957. Vol. 2. P. 240—248.
169. Смирнов И. А., Шадричев Е. В., Кутасов В. А.// Физика твердого тела. 1969. Т. И. С. 3311—3319.
170. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп: Пер. с англ. М.: Мир. 1967.
171. Long D. Energy Bands in Semiconductors. N. У.— Lond.: Sydney Interscience Publ. A Division John Wiley and Sonk 1968.
172. Minden H. T.//Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 17 P. 358—364.
173. Kessler F. R.//Phys. Stat. Sol. 1964. Vol. 6 P. 3—9.
174. Stordeur M., Kuhnberger W.//Phys. Stat. Sol. (b) 1975. Vol. 69. P. 377—385.
175. Damon D. H., Miller R. C., Emtage P. R.//Phvs Rev. B. 1972. Vol. 5. P. 2175—2183
176. Becia P., Gummieuny Z., Misiewicz J.//Opt. Appl. 1979. Vol. 9. P. 143—149.
177. Шевченко В. Я., Маренкин С. Ф., Пономарев В. Ф.//Журн. неорганические материалы. 1977. Т. 13. С. 1898—1900.
178. Steigmeier E. F., Kudman L.//Phys. Rev. 1966. Vol. 141. P. 767—774.
179. Pigon K.//Bu!!. Acad. Pol. Sci. Ser. Sci. Chem. 1961. Vol. 9. P. 751—757.
180. Masumoto K., Komiya H.//J. Jap. Instrum. Met. 1964. Vol. 28. P. 273—279.
181. Цуркан А. Е., Максимова О. Г., Верлан В. И./, Сложные полупроводники и их физические свойства. Кишинев: Штиница. 1971. С. 128—134.
182. Naake M. **J.,** Belcher S. C.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 3064 -^3067.

183. Domingo a, Itoga R. S., Kannewur C. R.//Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 536—539.

184. Марков Ю. Ф. Исследование оптических свойств полупроводниковых соединений в далекой инфракрасной" области спектра. Дис. ...канд. физ.-мат. наук. Л. ФТИ им. Л. Ф. Иоффо. 1972.

185. Ehrenreich H.//Phys. Rev. 1960. V. 120. P. 1951-1954.

186. Панфилов В В., Субботин Л. С, Верещагин Л. Ф.//ДОКЛ. АН СССР. 1971. Т. 96. С. 559—567.

187. **Полупроводниковые** соединения II—**V** групп. М.: Наука. 1978.

188. Heller M. W., Babiskin J., Radff R. L.//Phys. Rev. 1971. Vol. A36. P. 363—366.

189. Zdanowicz W., Wojakowski A.//Phys. Stat. Sol. 1966. Vol. 16. P. K129—K131.

190. Zdanowicz W., Wojakowski A.//Ibid., 1965. Vol. 8. P. 569-573.

191. Arushanov E. K-, Lashul A. V., Mashovets D. V.// Phys. Stat. Sol. (b). 1980. Vol 102. P. K121—K124.

192. Gelten **M. J.,** Von Liehout A., van Es **C,** Blout F. A. P.//J. Phys. 1978. Vol. CII. P. 227—237.

193. Slack G. A.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 143 P. 666-674.

194. Мороз А. И., Одарич В. А.//Укр. физ. журн. 1971. Т. 16. С. 1501—1504.

195. Turner W. Y., Fischler A. S., Reese W. E.//Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 759 767.

196. Bloom F. A. P.. Gelten M. J.//Ibid. 1979. Vol. Б19. P. 2411—2419.

197. Коломиец Б. Т., Мазец Т. Ф., Сарсембиюв Ш. Ш.//ФИЗ и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 2301-2305.

198. Шутов С. О., Соболев В. В., Смешливый Л. И. Пвдупроводниковые соединения и их твердые растворы. Кишинев: Изд^во ЛИ МССР. 1970. С. 155-163.

199. Whitsett C. R., Nelson D. A.//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 5. P. 3125 3134.

200. Overhof H.//Phys. Stat. Sol. 1971 Vol. 43. P. 221—228.

201. Miller K. A., Schneider **J**.//Phys. Lett. 1963. Vol. 4. P. 288-293.

202. Look D. C, Moore **D.** L.//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 5. P. 3406—3412.

203. Kohler H., Fabricins A.//Phys. Stat. Sol. (b). 1975. Vol. 71. P. 487—493.

204. Bloom F. A. P.//Intern. Summ. School on Narrow—gap Semicond. Phys and Applic. Nimes (France). 1979. p. 191—198.

205. Kawasaki T., Tanaka T.//J. Phys. Soc. Jap. 1966. Vol. 21. P. 2475—2483.

206. Eichler W., Simon G.//Phys. Stat. Sol. (b). 1978. Vol. 86. P. K85—K87.

207. Helbig R., Wagner P.//J. Phys. Chem. Sol. 1974. Vol. 35. P. 327—328.

208. Hagenberg F.//Thesis. D83. T. U. Berlin. 1980.

209. Grant F. A.//Rev. Mod. Phys. 1959. Vol 31. P. 646-652.

210. Yu P. Y., Cardona M.//J. Phys. Chem. Sol. 1973. Vol. 34. P. 29-37.

211. Frederikse H. P. R.//J. Appl. Phys. 1961. Suppl. Vol. 32. P. 2211—2219.

212. Остин И. Г., МоТТ Н. Физики о физике: Пер. с англ. М.: Знание. 1972

213. Frederikse **H. P.** R.//J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 32. P. 2211 2219.

214. Кесамаилы Ф. **П**.//Физ. и техн. полупроводников. 1974. Т. 8. С. 225—231.

215. Kikuchi Y., Chubachi N., Iinuma K.//Sendai Symp. Acustoelectron Jpn., 1968.

216. Справочник химика. М.: Химия. 1964.

217. Spear W. E.. Mort P.//Proc. Phys. Soc. 1963. VoL 81. P. 130 137.

218. Крупишев **Р.** С., Абагян С. А., Давыдов А. А., КаРУШина А. А.//**ФИЗ.** и техн. полупроводников. 1972.

219. Kahan A., Lipson H. G., Loewinstein E. V.//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964. P. 1067—1071

220. Mitra S. s!, Marshall R.//Ibid. P. 1085—1090.

221. Киреев П. С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа. 1969.

222. ZaUen R. e. a.//Phys. Rev. 1970. Vol. BL P. 4058—4064

223. Szusukiewicz W.//Phys. Stat. Sol. (b). 1979. Vol. 91. P. 361-368.

224. Wright G. B., Strauss **A.J.,** Harman T. C.//Phys. Rev. 1962. Vol. 125. P. 1534—1543

225. Фистуль В. И. Сильно легированные полупроводники. М.: Наука. 1967.

226. Prince M. B.//Phys. Rev. 1954. Vol. 93. P. 1204—1213.

227. Lehoczky S. L., Broerman **J.** G., Nelson D. A., Whitsett C. R.//Ibid. 1974. Vol. B9. P. 1598—1620.

228. Brebrick R. **P.,** Scanlon W. W.//Ibid. 1954 Vol 99. P. 598—608.

229. Stradling R.//So!. Stat. Commun. 1968. Vol. 6. P. 665—673.

230. Cardona M.//Phys. Ill—V Compounds. Acad. Press 1966. Vol. 3. P. 125—132

231. Stradling R. Electronic Components. Lond.: Pergamon Press. Oct. 1958. P. 1135—1142.

232. Walton A.. Mishra LI.//Proc. Phys. Soc. 1967. Vol. 90. P. 1111—1118.

233. Stradling R.//Phys. Lett. 1966. Vol. 20. P. 217—226.

234. Prince M. B.//Phys. Rev. 1953. Vol. 92. P. 681—687.

235. Кот М. В., Прилепов В. Д., Цуркан А. Е.//Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Кишинев: Изд-во АН МССР. 1970. С. 3—9.

236. Машковский М. В. Зарубежная электронная техника. М.: Изд. ЦНИИ «Электроника». 1974. Вып 12. С. 3-9.

237. Kalashnikow S. G.//J. Phys. Chem. Sol. 1959. Vol. 8. P. 52—57.

238. Ewald A. W., Tutle O. N.//Ibid. P. 523—531.

239. Иванов-Омский М. В. И., Коломиец **Б.** Т., Огородников В. К.//**ФИЗ.** и техн. полупроводников. 1970 Т. 4. С. 264 268.

240. Galazka R. R.//Phys. Lett. 1970. Vol. 32A. P 101—107.

241. Nasledow D. N.. Shevchenko V. Ya.//Phys. Stat. Sol. (a) 1973. Vol. 15. P. 3—8.

242. Кристаллохимические, физико-химические и физические свойства полупроводниковых веществ. М.: Издво стандартов. 1973.

243. Гельмонт **Б.** Л., Иванов-Омский В. И., Коломиец **Б. Т.//ФИЗ** и техн. полупроводников 1971. Т. 5. С. 266—269.

244. Szymanska W.//Physics Narrow Gap Semiconductors. Proc. III Intern. Conf./Warzawa, Sept. 1977. Eds. J. Rauluszkewicz, M. Gorska, F. Kaczmarek. Warszawa: PWN-Polish-Sci. Publishers, 1978.

245. Dziuba Z., Wrobel **J**.//Phys. Stat. Sol. (b). 1980. Vol. 100. P. 379—384.

246. Redin R. D., Morrich G., Danielson G. C.//Phys. Rev. 1958. VoL 109. P. 1916—1919.

247. Kato N., Kummura M., Iwami M., Kawabe K.// Jap. J. Appl. Phys. 1977. Vol. 16. P. 1623—1627

248. Grigas **J**.//Krist. Techn., 1978. Vol. 13. P. 683—686.

249. Соминский М. С. Полупроводники. Л.: Наука.

250. Stirn R. J., Becker W. M.//Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 907—914.
251. Reid F. J., Willardson R. K.//J. Electron. Control. 1958. Vol. 5. P. 54—62
252. Baars J., Jorger F.//Sol. Stat. Commun. 1972. Vol. 10. P. 875—881.
253. Ilegems M., Montgomery H. C.//J. Phys. Chem. Sol. 1973. Vol. 34. P. 885—893.
254. Burstein E., Pinczuk A., Wallis R. F.//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32, Suppl. № 1. P. 251—254.
255. Rode D. L.//Serniconductors and Semimetals/Eds. R K. Willardson, A. C. Beers. N. Y:. Academ Press. 1975. Vol. 10.
256. Casey H. C., Ermanis F., Wolfstirn K. B.//J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 2945—2953.
257. Solomon R.//2nd Intern. Symp. GaAs and Related Compounds. 1968. Lond.: Inst. Phys. 1969. P. 11—15.
258. Roy B., Ckakraberty B. R., Bhattacharya R., Dutta A. K.//Sol. Stat. Commun. 1978. Vol. 25. P. 937—940.
259. Wiley J. D.//Semiconductors and Semimetals/Eds. R. K. Willardson, A. C. Beers. N. Y.: Academ. Press. 1975. Vol. 10.
260. Vilms J., Garrett J. P.//Sol. Stat. Electron. 1972. Vol. 15. P. 443—449.
261. Marshall J. M.//J. Phys. C. 1977. Vol. 10. P 1283—1287.
262. Дахно А. Н., Емельяненко О. В., Лагунова Т. С., Метревели С. Г.//Физ и техн. полупроводников. 1976. Т. 10. С. 677—681.
263. Голованов В. В., Метревели С. Г., Сиукаев Н. В., Старосельцева С. П.//Там же 1969. Т. 3. С. 120—122.
264. Stillman G. E., Wolfe C. M., Dimmock J. 0.//Semiconductors and Semimetals/Eds. R. K. Willardson, A. C Beers. N. Y.: Acad. Press. 1977. Vol. 12. P. 169—173.
265. Трифонов В. И., Яременко Н. Г.//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 953—958.
266. Яременко Н. Г., Потапов В. Т., Ивлева В. С.// Там же. 1972. Т. 6. С. 1238—1243.
267. Rode D. L.//Phys. Rev. 1971. Vol. B3. P. 3287-3292.
268. Schein L. B.//Ibid. 1977. Vol. B15. P. 1024—1029.
269. Филипченко А. С, Большаков Л. п.//Phys. Slat. Sol. 1976. Vol. 77.-P. 53—57.
270. Лихтер А. И., Пель Е. Г., Присяжнюк С. И.// Phys. Stat. Sol. (a). 1972. Vol. 14. P. 265—275.
271. Kippermann A. H. M.//Sol. Stat. Commun. 1971. Vol. 9. P. 1825—1833.
272. Kipperman A. H. M., Van der Leeden 0. A.//Ibid 1968. Vol. 6. P. 657—666.
273. Kipperman A. H. M., Vermij C. J.//Nuovo Cimento. 1969. Vol. B63. P. 29—37.
274. Tatsuyama C., Hamaguchi €., Tomita H., Nakai J. //Jap. J. Appl. Phys. 1971. Vol. 10. P. 1698—1703.
275. Fivaz R., Mooser E.//Phys. Rev. 1969. Vol. 163. P. 743—749.
276. Fivaz R., Shmid Ph. E.// Physics and Chemistry of Materials with Layered Structures/Ed. P. A. Lee. Vol. 4. Optical and Electrical Properties. Lond.: D. Reidel Publ. Cотр. 1976. P. 343—348.
277. Fisher G., Brebner J. L.//J. Phys. Chem. Sol. 1962. Vol. 23. P. 1363—1374.
278. Gouskov L., Gouskov A.//So!. Stat. Commun. 1978. Vol. 28. P 99—108.
279. Fielding P., Fisher G., Mooser E.//J. Phys. Chem. Sol. 1959. Vol. 8. P. 434—444.
280. Nishino T., Hamakawa Y.//Jap. J. Appl. Phys. 1977. Vol. 16. P. 1291—1299.
281. Damon R. W., Redington R. W.//Phys. Rev. 1954. Vol. 96. P. 1498—1509.
282. Sugaike S.//Minera! J. 1957. Vol. 2. P. 63—72.
283. Itoga R. S., Kannewurf C. R.//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32. P. 1099—1108.
'284. IRarl T., Hashimoto K.//Phys. Stat. Sol. (a). 1975. Vol. 31. P. K115~KU7. Vb •
285. Makita Y., Kobayashi K., Kanada M., Kawai T// J. Phys. Soc. Jap. 1968. Vol. 25. P. 816—824.
286. Kobayashi K., Kawai T., Kanada M.//Ibid. 1967. Vol. 23. P. 305—309.
287. Kawai T., Kabayashi K., Kurita M., Makita Y.// Ibid. 1971. Vol. 30. P. 1101- 1105.
288. Физико-химические свойства полупроводниковыл веществ. Справочник. М.: Наука. 1979
289. Берчеико Н. Н., Кревс В. Е., Средин В. Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение. М.: Воениздат. 1982.
290. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology/Ed O Madelung. Berlin: Springer-Vergal. 1982. Vol. 17. Subvol. b
291. Коиуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях: Пер. с англ/Под ред. И. Б. Левинсона и Ю. К. Пожелы. М.: Мир. 1970
292. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationship in Science and Technology/Ed. O. Madelung. Berlin: Springer-Verlag. 1982. Vol. 17. Subvol. a.
293. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technolgy//Ed O Madelung, Berlin: Springer-Verlag. 1983. Vol. 17. Subvol. e.
294. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology/Ed. O. Madelung, Berlin: Springer-Verlag. 1983. Vol. 17. Subvol. f.
295. Kamath G. S.//Mater. Res. Bull. 1969. Vol. 4. P. S57—S59.
296. Van Daal H. J., Knippenberg W. F., Wasscher J. D.//J. Phys. Chem. Sol. 1963. Vol. 24. P. 109-114.
297. Nimtz G., Schlicht B.//Springer Tracts in Modem Physics. Berlin: Springer-Verlag. 1983. Vol. 98.
298. Van den Dries J., Lieth R. Phys. Stat. Sol. (a). 1971. Vol. 5. P. K.171 -K173.
299. Stourac L., Zavetova M., Abraham A.//Proc. 12th Intern. Conf. Phys. Semicond., Stuttgart, Teubner 1974 P. 621—628.
300. Stanchev A., Vodenicharov C.//Thin Solid Films. 1976. Vol. 38. P. 67-78.
301. Asanabe S., Okazaki A.//J. Phys Soc. Jap. 1960. Vol. 15. P. 989—993.
302. Kyriakos D. S., Valassiades O., Economou N. A.// Instrum. Phys. Conf. 1979. Ser. 43, chapt. 8.
303. Анисимов Б. Б., Габедова А. А., Джамагидзе Ш. З.//ИЗВ. АН СССР. Сер. неорган, матер. 1978. Т. 14. С. 1417—1422.
304. BaЫ S. K., Chopra K. L.//J. Appl. Phys. 1970. Vol.. 41. P. 2196-2199.
305. Yabumoto T.//J. Phys. Soc. Jap. 1958. Vol. 13. P. 972-983.
306. Albers W., Haas C., Vink H. e. a.//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 2220-2225.
307. Umeda J.//J. Phys. Soc. Jap. 1961. Vol. 16. P. 124—128.
308. Maier H., Daniel D. R.//J. Electron. Mater. 1977. Vol. 6. P. 693—698.
309. Sagar A., Miller R. C.//Proc. Intern. Conf. Phys. Semicind. Exeter. July 1962/Ed. A. C. Stickland. 1962. P. 653—659.
310. Allgaier R. S., Houston B.//Phys. Rev. 1972. VoL B5. P. 2186—2189.
311. Fonstad C. G., Rediker R. H.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. J. 2911—2923.
312. Gowers J. P., Lee P. A.//Sol. Stat. Commun, 1970. Vol. 8. P. 1447-1453.
313 Козлов С. Ф. Дис. ...докт. физ.-мат. наук. М.; ИАЭ им. И. В. Курчатова. 1985.

Глава 23

ДИЭЛЕКТРИКИ

А. П. Гелпе

23.1. Общие сведения

Диэлектриками называют вещества, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электростатического поля. Такое поле может длительно сохраняться лишь в средах, плохо проводящих электрический ток. Электропроводность — способность проводить электрический ток — обусловлена наличием в веществе свободных носителей заряда—электрически заряженных частиц, которые под действием внешнего электрического поля направленно перемещаются сквозь толщу материала, создавая ток проводимости (положительно заряженные носители движутся по направлению вектора напряженности электрического поля *Е,* отрицательно заряженные—против). Параметром вещества, количественно определяющим его электропроводность, является удельная электршеская проводимость у, См/м, а также удельное объемное электрическое сопротивление р=1/у, Ом-м, причем

$$f = nqu,$$

где п — концентрация носителей заряда, м-®; *q* — электрический заряд носителя, Кл; и — подвижность носителя, mV(B-c); *{U=VIE,* где г; — скорость направленного движения носителя, м/с, в электрическом поле с напряженностью *Е,* В/м). Носителями заряда в диэлектриках могут быть ионы, электроны и молионы — заряженные коллоидные частицы. Плотность тока проводимости (А/м^) j^уЕ. Идеальный диэлектрик, не существующий в действительности, не содержит свободных носителей и поэтому не способен проводить электрический ток: у него Y и / равны нулю, а р бесконечно велико. У реальных диэлектриков Ом-м, их удельная проводимость вследствие малой концентрации носителей так мала, что их считают практически не проводящими ток материалами. Между диэлектриками и полупроводниками нет точной границы, так что нижнее значение диапазона ве-Iичин р диэлектриков условно.

Помимо удельного объемного сопротивления, для краткости обычно называемого удельным сопротивлением, применительно к твердым диэлектрикам в качестве параметра введено удельное поверхностное сопротивление ps, Ом, имеющее важное значение при выборе материала для работы в увлажненных и загрязненных средах.

При повышении электрического напряжения, приложенного к образцу диэлектрика, он остается практически пспрооодящим (сохраняет высокое р) до тех пор, пока под действием сил электрического поля в диэлектрике не образуется канал с высокой электропроводностью, что приводит практически к короткому замыканию между электродами, т. е. к пробою диэлектрика. Минимальное напряжение, приложенное к образцу диэлектрика и вызывающее его пробой, называют пробивным напряжением (Unp. Поскольку образцы одного и того же диэлектрика различной толщины пробиваются при разных напряжениях, величина Unp не может характеризовать стойкость материала к пробою. Параметром диэлектрического материала, определяющим его способность противостоять пробою, является электрическая прочность £пр — напряженность электрического поля в диэлектрике, при достижении которой происходит его пробой. Определяется эта характеристика так:

$$£nt. = f/np/d.$$

где d —толщина образца диэлектрика в месте пробоя. Величину £пр принято выражать в мегавольтах на метр (МВ/м). В практике электрическую прочность удобно оценивать в киловольтах на миллиметр (1 кВ/мм = = 1МВ/м).

Механизм пробоя диэлектриков может иметь различный характер. Основными видами пробоя твердых диэлектриков являются электрический и тепловой. Электрический пробой представляет собой разрушение диэлектрика силами электрического поля и сопровождается образованием электронных лавин. Тепловой пробой обусловлен нагревом диэлектрика до критической температуры вследствие диэлектрических потерь при нарушении с диэлектрике теплового равновесия. Значение £пр при электрическом пробое составляет примерно 100—1000 МВ/м, а при тепловом — 1—10 МВ/м.

К электрическим параметрам диэлектриков относится диэлектрическая проницаемость, характеризующая способность материала создавать электрическую емкость. В СИ различают относительную диэлектрическую проницаемость Вг (прежде е), величину безразмерную, и абсолютную диэлектрическую проницаемость бгво, Ф/м (ео — электрическая постоянная, по старой терминологии — диэлектрическая проницаемость вакуума, равная 8.854-10-'^ Ф/м).

Диэлектрики, в силу того, что свободных носителей заряда в них мало, состоят по сути из связанных заряженных частиц: положительно заряженных ядер и обращающихся вокруг них электронов в атомах, молекулах и ионах, а также упруго связанных разноименных ионоз, расположенных в узлах решетки ионных кристаллов. Поляризация диэлектриков — упорядоченное смещение связанных зарядов под действием внешнего электрического поля (положительные заряды смещаются по направлению вектора напряженности поля *Е,* а отрицательные— против него). Смещение I невелико и прекращается, когда сила электрического поля, вызывающая движение зарядов относительно друг друга, уравновешивается силой взаимодействия между ними. В результате поляризации каждая молекула или иная частица диэлектрика становится электрическим диполем — системой двух связанных одинаковых по значению и противоположных по знаку зарядов *q,* Кл, расположенных на расстоянии I, м, друг от друга, причем д —это либо заряд иона в узле кристаллической решетки, либо эквивалентный заряд системы всех положительных или системы всех отрицательных зарядов поляризующейся частицы. Считают, что в результате процесса поляризации в частице индуцируется электрический момент ***p=ql,*** Кл-м. У линейных диэлектриков {их большинство) между индуцируемым моментом и напряженностью электрического поля *Е,* действующей на частицу, существует прямая пропорциональность: *p=aE.* Коэффициент пропорциональности а, Ф•м^ называют ***поляризуемостью*** данной частицы. Количественно интенсивность поляризации определяется поляризованностью *Р* диэлектрика, которая равна сумме индуцированных электрических моментов всех *N* поляризованных частиц, находящихся в единице объема вещества:

$$P=pN \quad \text{или} \quad P=-.aNE,$$

где *Р—ъ* Кл/м2; Л/— в м-^ £ — в В/м. Следовательно, чем больше поляризуемость отдельной частицы *а* и выше концентрация частиц *N,* т. е. чем больше произведение *aN,* тем интенсивнее процесс поляризации. Из уравнения, связывающего *Р* и бл, следует:

l + Na/B^.

(Эта формула пригодна для газообразных, но в ряде случаев с большим или меньшим приближением может быть применена также для жидких и твердых диэлектриков.) Таким образом, по физическому смыслу диэлектрическая проницаемость—количественная мера интенсивности процесса поляризации диэлектриков. Концентрация ***N*** поляризующихся частиц невелика в газах и намного выше в жидких и твердых диэлектриках. Поляризуемость частицы а зависит от механизма поляризации, о'пределяемого природой диэлектрика.

Основными видами поляризации являются электронная. ионная и дипольная.

Электронная поляризация — упругое смещение электронных орбит относительно ядер в атомах, молекулах и ионах под действием внешнего электрического поля. Таким образом, электронная поляризация происходит во всех диэлектриках независимо от существования в них других видов поляризации. Это быстрая поляризация, совершающаяся за время порядка 10-'"—Ю"'^ с, сравнимое с периодом световых колебаний. В неполярных диэлектриках существует только электронная поляризация и поэтому а=аа (электронная поляризуемость). Неполярные молекулы имеют симметричное строение и поэтому центры тяжести эквивалентных положительного и отрицательного зарядов у них совпадают, так что в отсутствие внешнего поля неполярные молекулы не имеют собственного электрического момента (ц=0).

Ионная поляризация — упругое смещение противоположно заряженных ионов в узлах кристаллической решетки ионных кристаллов под действием внешнего поля. Это тоже быстрый вид поляризации, устанавливающийся за время порядка 10"'^ с. Поскольку в ионных кристаллах существует еще и электронная поляризация, а=аэ+а„ (аи — ионная поляризуемость) и такие диэлектрики отличаются большим значением вг, чем неполярные.

Быстрые виды поляризации происходят без потерь энергии.

Дипольная поляризация характерна для полярных диэлектриков. Полярные молекулы имеют несимметричное строение. Центры тяжести эквивалентных разноименных зарядов у них не совпадают, и поэтому в отсутствие внешнего поля эти молекулы обладают собственным электрическим моментом ц^т^О, т. е. являются жесткими (постоянными) диполями. Сущность дипольной поляризации состоит в повороте (ориентации) этих жестких диполей в направлении электрического поля. Поскольку в полярной молекуле существует также и электронная поляризация, а=аа-Ьад, где ад — дипольная поляризуемость, и поэтому полярные диэлектрики имеют *г,* больше, чем неполярные. Дипольная поляризация относится к замедленным (релаксационным) видам поляризации. Для ее завершения требуется время порядка 10"^—Ю-'" с. Поляризации релаксационного вида запаздывают во времени от в ю i о « внешнего электрического поля и сопровождаются потерями энергии

К замедленным bida я Of сационная поляризация, происходящая в неорганических стеклах и кристаллах с неплотной упаковкой ионов, и миграционная, свойственная твердым диэлектрикам при наличии макроскопических неоднородностей.

Нелинейным диэлектрикам — сегнетоэлектрикам наряду с электронной и ионной свойственна спонтанная (самопроизвольная) поляризация, относящаяся к числу релаксационных видов. Спонтанная поляризация возникает в определенном температурном интервале, ограниченном сегнетоэлектрическими точками Кюри, под влиянием внутренних процессов самопроизвольно. При этом структура элементарной ячейки кристалла становится несимметричной, приобретая электрический момент. В пределах небольших областей (доменов) электрические моменты соседних элементарных ячеек сориентированы параллельно, так что домен самопроизвольно весьма интенсивно поляризуется. Соседние домены поляризуются в различных направлениях, и первоначально поляризованность ***Р*** образца материала в целом равна нулю. При воздействш! внешнего электрического поля векторы поляризованиости доменов ориентируются параллельно и весь образец оказывается интенсивно поляризованным в одном направлении. Значение Вг у сегнетоэлектриков может доходить вблизи точки Кюри до 10®.

В диэлектрике, находящемся в электрическом поле, происходит рассеяние (диссипация) энергии. Рассеиваемую за одну секунду энергию (мощность) называют ***диэлектрическими потерями.*** Теряемая энергия преобразуется в теплоту, вызывая нагрев диэлектрика, вследствие чего ухудшаются электрические и другие важные его характеристики. Потери в диэлектриках наблюдаются как при переменном, так и при постоянном напряжении, однако под диэлектрическими потерями понимают мощность, рассеиваемую в переменном электрическом поле. Вектор тока в образце диэлектрика, включенном под переменное напряжение, опережает по фазе вектор напряжения на угол ф<90°. Угол б, дополняющий ф до 90°, называют ***углом диэлектрических потерь.*** В идеальном диэлектрике без потерь ф=90° и 6=0. В качестве параметра диэлектрика используется tg б — ***тангенс угла диэлектрических потерь.***

Полные диэлектрические потери в образце диэлектрика емкостью С, включенном под переменное напряжение и с угловой частотой со,

$$P = и^{\tau}C\ tgB,$$

где Р —в Вт; U (действующее значение) -в В; ***I — в*** Гщ С — в Ф.

Для оценки потерь в любой точке образца диэлектрика с известным значением напряженности электрического поля ***Е*** удобно определять удельные диэлектрические потери:

$$\frac{hrigb}{1{,}8.!01«\ \ '}$$

где ***р — в*** Вт/м^ £• — в В/м; f — в Гц. Величина Уа= =fe.tg6/(1,8-101")—удельная активная проводимость диэлектрика, См/м, с параметрами е, и tgS, работающего на переменном напряжении при частоте ***f,*** Гц. Способность диэлектрика создавать диэлектрические потери в переменном поле характеризуется произведением Е,tg6, называемым ***коэффициентом диэлектрических потерь.***

Удельные потери диэлектрика в постоянном электрическом поле определяются только током проводимости:

Рпост =

Здесь Рпост —в Вт/м^ ***Е — в*** В/м; удельная проводимость Y — в См/м.

В переменном электрическом поле различают три главных вида диэлектрических потерь:

1) потери на электропроводность — возникают во всех диэлектриках;

2) релаксационные потери — обусловлены замедленными видами поляризации;

3) ионизационные потери — свойственны:

ным диэлектрикам, а также жидким и твердым hdh наличии в них воздушных или иных газовых включении.

Электрические параметры диэлектриков не являются физическими константами и могут зависеть от многих внешних факторов (температура, частота изм< трического поля, влажность окружающей среды и др.).

Важное для практики значение имеют и неэлектрические свойства диэлектриков: механические, тепловые

(в том числе нагревостойкость и холодостойкость), физико-химические, радиационные и др.

В большинстве случаев практики применяются пассивные диэлектрики (электрическая изоляция, диэлектрические волноводы, электрические конденсаторы). В последнее время широкое распространение получили активные (управляемые) диэлектрики, резко изменяющие свои свойства под действием внешних (управляющих) факторов (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты и др.).

Поведение диэлектриков в электрическом поле, зависимость их характеристик от различных факторов рассмотрены в монографиях и пособиях [1—7, 9], свойства представлены в справочной литературе [9—12], методы определения электрических и неэлектрических характеристик диэлектриков — в [8, 9].

23.2. Газообразные диэлектрики

Газы в обычных условиях характеризуются высоким удельным сопротивлением и очень малыми диэлектрическими потерями. К достоинствам газов относятся также восстановление электроизоляционных свойств после пробоя и отсутствие старения (ухудшение свойств со временем). Недостатком их является невысокая (по сравнению с жидкими и твердыми диэлектриками) электрическая прочность при нормальном давлении. Для увеличения электрической прочности используют как повышение давления газов, так и глубокое их разрежение Повысить электрическую прочность газовой изоляции можно также, применяя электроотрицательные газы. Молекулы этих газов, содержащие обычно атомы фтора, хлора и других галогенов, способны захватывать свободные электроны и становиться малоподвижными отрицательными ионами. Удаление подвижных электронов затрудняет развитие электрического разряда, вследствие чего электрическая прочность газа возрастает.

Важнейшим для электротехнической практики газообразным диэлектриком является воздух, особенно при близких к нормальным атмосферным условиях. В табл. 23.1 приведены свойства некоторых газов в сравнении с воздухом (соответствующие параметры воздуха приняты за единицу).

Диэлектрическая проницаемость газов вследствие их малой плотности (т. е. концентрации *N* молекул — поляризующихся частиц) мало отличается от единицы. Значения Ег различных газов приведены в табл. 23.2. С ростом давления (при постоянной температуре) вг газов растет ввиду увеличения концентрации поляризующихся частиц. Значения Вг для некоторых газов при различных давлениях приведены в табл. 23.3.

Газы в слабых электрических полях и при не очень высоких температурах обладают весьма малой удельной проводимостью. При этих условиях весьма немногочисленные свободные носители заряда — электроны и ионы—образуются лишь под действием внешних ионизаторов невысокой интенсивности — космических лучей и естественного ионизирующего излучения. Поэтому при указанных условиях газы являются отличными диэлектриками с удельным сопротивлением порядка 10® Ом-м, практически не имеющим диэлектрических потерь (tgS порядка 10-®). Повышение электропроводности газов происходит при высоких температурах, начиная с 10®—10° К, когда энергия теплового движения частиц газа велика и при столкновении они могут ионизовать друг друга (происходит термическая ионизация). Термоионизация воздуха нарастает, начиная с температуры 8000 К. При 20 000 К воздух ионизуется практически полностью [7]. Процесс термоионизации играет определяющую роль в хорошо проводящем ток канале электрической дуги, температура которого составляет 4000—15 000 К.

В основе механизма пробоя газов лежит процесс ударной ионизации, обусловленный свободными электронами, которые, будучи разогнаны в электрическом поле, ионизуют при соударении нейтральные молекулы газа. Развитию пробоя способствует также фотоионизация, обусловленная фотонами, которые испускают возбужденные при соударениии с электронами молекулы газа, переходя из возбужденного состояния в нормальное.

Развитие пробоя зависит от степени однородности электрического поля, в котором происходит пробой газа. Если в однородном поле напряженность поля постоянна, а в слабонеоднородном поле изменяется вдоль силовой линии не более чем в 2—3 раза, то в резконеоднородном — на несколько порядков.

В однородном поле пробой наступает практически мгновенно по достижении определенного напряжения t/пр. Между электродами возникает искра, которая при достаточной мощности источника напряжения может перейти в электрическую дугу. Для газов установлен закон Пашена: при неизменной температуре пробивное напряжение газа зависит от произведения его давления *р* на расстояние *d* между электродами: *Uпр=f(pd).* На рис. 23.1 эта зависимость представлена для воздуха и водорода. Для каждого газа характерно существование минимального значения пробивного напряжения при определенном значении *pd* (для воздуха 327 В при pd=665 Па-мм). Минимальное пробивное напряжение некоторых других газов. В: аргон 195; водород 280; углекислый газ 420. Если иметь в виду пробой на переменном напряжении, то приведенные данные относятся к амплитудным значениям. Как видно из рис. 23.1, при давлении, близком к нормальному (0,1 МПа), и реальных межэлектродных расстояниях произведение *pd* таково, что рабочая точка для воздуха находится на правой ветви кривой Пашена. Поэтому с увеличением *р* или *d Unp* растет, а при уменьшении их — снижается. Левая ветвь соответствует разреженным газам, так как межэлектродные расстояния порядка 0,001 мм при атмосферном давлении на практике не применяются. Для повышения Uup газовых промежутков используют как повышение давления (обычно до 1,5 МПа), так и глубокое разрежение газа (вакуум). При значительном снижении давления газа (левая ветвь кривой Пашена) l/пр растет из-за затруднения образования газового разряда вследствие малой вероятности столкновения заряженных частиц с молекулами. Но рост не беспределен: при давлениях порядка 10"'—10'^ Па (10"®—Ю-* мм рт. ст.) газовый разряд переходит в вакуумный. Вакуумный же пробой обусловлен процессами на электродах, и поэтому Unp в вакууме зависит от материала и состояния поверхности электродов [13, 14].

Даже в однородном поле при неизменных давлении и температуре электрическая прочность газа не остается неизменной. При малых межэлектродных расстояниях

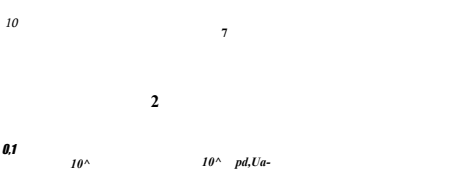


Рис. 23.1. Зависимость f/„p воздуха (/) и водорода *(2)* от произведения давления р на расстояние между электродами *d* [9]

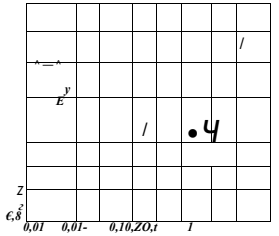
из-за затруднения в образовании электронных лавин Епр существенно возрастает. В табл. 23.4 приведены значения £пр воздуха при нормальных условиях при изменении *d* в пределах от 0,006 до 1 см.

В слабонеоднородном поле, как и в однородном, проооой газового промежутка происходит сразу при возрастании приложенного напряжения до Unp. Особенностью пробоя газа в резконеоднородном поле является возникновение при сравнительно низком напряжении коронного разряда (короны) в области с повышенной напряженностью электрического поля (вблизи электрода с малым радиусом кривизны), а пробой промежутка происходит при более высоком напряжении, так что пробой газа в резконеоднородном поле характеризуется двумя значениями напряжений: начальным (коронным) U^ и более высоким пробивным U„п.

В неоднородном поле пр в ряжение газа при том же расстоянии между электродами тем ниже, чем больше степень неоднородности поля. Поэтому в однородном поле и„р газа максимально, наименьшее значение и„р имеет газовый промежуток между электродами стержень — плоскость, между которыми создается электрическое поле с наиболее высокой степенью неоднородности. На рис. 23.2 и 23.3 приведены зависимости V-np воздушного промежутка от расстояния между электродами для однородного и резконеоднородных полей.

В несимметричных электрических полях, которые создаются либо между электродами неодинаковой формы, либо между одинаковыми электродами при заземлении одного из них (при этом симметрия поля нарушается влиянием земли и других заземленных предметов), при пробое газового промежутка на постоянном напряжении характерно существенное влияние на i/np полярности электродов (рис. 23.4) Этот эффект обусловлен влиянием положительного объемного заряда, образующегося вблизи электрода с меньшим радиусом кривизны (у незаземленного электрода при одинаковой их форме).

Пробой газа при высоких частотах отличается своеобразием. На рис. 23.5 приведена зависимость пробив-



Рнс. 23.2. Зависимость Unp и fnp (в амплитудных значен|ях) в однородном поле от расстояния между электродами в воздухе при частоте 50 Гц, температуре 20°С и давлении 0,1 МПа [15]

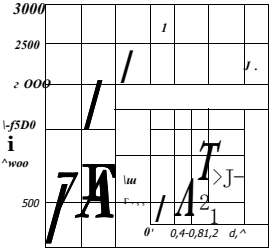


Рис. 23.3. Зависимость амплитудных значений U^p воздушного промежутка от расстояния между электродами стержень—стержень (/) и стержень—плоскость (2) при частоте 50 Гц, температуре 20°С и давлении 0,1 МПа [16]

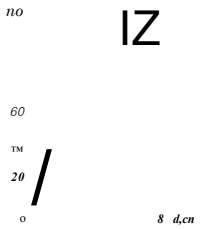


Рис. 23.4. Зависимость i/np воздушного промежутка от расстояния между электродами стержень — плоскость при различной их полярности [17]

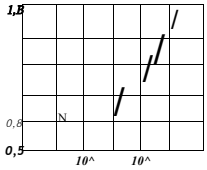


Рис. 23.5. Зависимость отношения пробивного напряжения воздуха при нормальных условиях в однородном поле от частоты *f* к пробивному напряжению при постоянном токе [9]

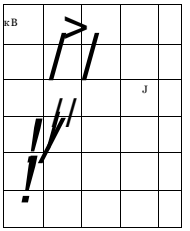


Рис. 23.6. Зависимость амплитуды разрядного напряжения в воздухе вдоль различных изоляционных цилиндров диаметром 50 мм в однородном поле при частоте 50 Гц от длины промежутка (высоты цилиндра) *d:* *t* – парафин; 2 – стекло; *3* – стекло при неплотном контакте с электродами; *4* – чисто воздушный промежуток [18]

иого напряжения воздуха в однородном электрическом поле при давлении 0,1 Л^Па от частоты (рассматривается отношение t/прf при частоте f к [/„ро в постоянном электрическом поле). При частотах до 10^ Гц пробивное напряжение от частоты не зависит, а с дальнейшим ростом частоты постепенно снижается, проходя через минимш в области частот 10ß—10^ Гц. Спад объясняется образова1шем в разрядном промежутке объемного заряда, облегчающего пробой При последующем возрастании частоты tv'np резко увеличивается. Это обусловлено тем, что с уменьшением времени полупериода при высоких частотах для накопления электронами достаточной для ионизации молекул энергии требуется существенное увеличение приложенного напряжения.

Разряд в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика называют ***поверхностным разрядом*** или ***поверхностным перекрытием.*** Внесение твердого диэлектрика в воздушный промежуток существенно снижает его разрядное напряжение, даже если цилиндрический образец поместить между параллельными пластинами, создающими в промежутке однородное поле. Хотя в этом случае образующие цилиндра совпадают с направлением силовых линий электрического поля и поэтому поле, казалось бы, должно оставаться однородным, разряд всегда развивается в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика при более низком напряжении, чем в чисто воздушном промежутке без цилиндра из твердого диэлектрика. На рис. 23.6 приведены зависимости напряжения поверхностного разряда в воздухе вдоль изоляционных цилиндров из различных твердых диэлектриков при частоте 50 Гц от высоты цилиндра (длины разрядного промежутка). Снижение разрядного напряжения обусловлено нарушением однородности электрического поля, так как пленка влаги на поверхности диэлектрического цилиндра имеет неодинаковую толщину в различных участах вдоль длины образца в результате чего напряжение вдоль цилиндра распределяется неравномерно. Поэтому гидрофобный (несмачивающийся) парафин в меньшей степени снижает разрядное напряжение по сравнению с чисто воздушным промежутком, чем гидрофильный (смачивающийся) фарфор или стекло. При

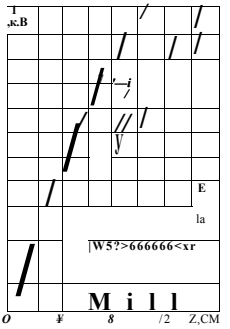


Рис. 23.7. Зависимость амплитудного разрядного напряжения в воздухе от расстояния между электродами по поверхности твердых диэлектриков в неоднородном поле при частоте 50 Гц:

/ – чисто воздушный промежуток; 2 – парафин; 3 – бакелит; 4 - фарфор и стекло 481

тщательном просушивании гидрофильных материалов их напряжение поверхностного перекрытия можно поднять практически до разрядного напряжения чисто воздушного промежутка.

Напряжение перекрытия в неоднородном поле существенно ниже, чем в однородном, причем гигроскопические свойства твердого диэлектрика влияют меньше (рис. 23.7), так как в неоднородном поле воздействие пленки влаги на форму электрического поля не столь заметно.

Сжиженные газы обладают высокими электроизоляционными свойствами: их Ег немногим более единицы, а

Таблица 23.1. Свойства газов по отношению к свойствам воздуха [9]

Характеристика	Азот	Углекислый газ	Водород	Эле-
Плотность	0,97	1,52	0,07	5,19
Теплопроводность	1,08	0,64		0,70
Удельная теплоемкость	1,05	0,85	14! 35	0,59
Электрическая прочность	1,00	0,90	0,60	2,3

Таблица 23.2. **Диэлектрическая проницаемость газов при температуре 20°С и давлении 0,1 МПа при различных частотах** [9]

Газ	Е при низких	при длине волны 30 мм
Гелий	**1,000072**	
Водород	**1,00027**	**1,000.%**
Кислород	**1,00055**	**1,00053**
Аргон	**1,00056**	–
Азот	**1,00058**	**1,00059**
Углекислый газ	**1,00096**	**1,00099**
Элегаз	**1,00191**	
Воздух	**1,00058**	**1,00058**

Таблица 23.3. **Диэлектрическая проницаемость ^г газов при различном давлении [9]**

Газ	П.1 МПа	2 МПа	4 МПа	10 МПа
Воздух (при IQX)	**1**,00058	1,0109	**1**,0218	1,0549
Азот (при 20°С)	**1**,00058	1,0109	–	1,055
Углекислый газ (при 15°С)	1,00098	1,020	1,050	–

Таблица 23.4. Электрическая прочность воздуха в однородном электрическом поле при 20°С и давленгы! 0,1 МПа при различном межэлектродном расстоянии [2j

d, см	0,**006 0,008**	0,02	0,06 О,
мЪ7м	12. **10,7 9,7**	7,4	5,3 4,5

электрическая прочность составляет 30—35 МВ/м [191. Некоторые свойства сжиженных газов приведены в табл. 23.5.

Таблица 23.5. **Свойства сжиженных газов** [20]

Характеристика	Азот	Кислород	Водород	Неон	Гелий
Температура кипения, К	77,4	90,2	20,4	27,2	4,2
Диэлектрическая проницаемость Е^	1,431	1.48	1.231		1,047

23.3. Жидкие диэлектрики

Жидкости легко загрязняются и трудно очищаются. Поэтому на практике применяют технически чистые жидкие диэлектрики, содержащие примеси как попадающие извне, так и образующиеся в результате процесса старения. Такие материалы характеризуются ***ионной*** и ***молионной электропроводностью.*** Ионная обусловлена диссоциацией молекул самой жидкости ***(собственная электропроводность)*** и примесей ***(примесная электропроводность).*** Для неполярных жидкостей характерна примесная электропроводность. Полярные же отличаются повышенной удельной проводимостью из-за наличия обоих видов ионной электропроводности, причем возрастание бг приводит к росту проводимости, так что сильно полярные жидкости с Вг более 20 (вода, спирты, кетоны

Таблица 23.6. **Характеристики жидких органических диэлектриков** [9, 10, 23]

Характеристика	Нефтяные масла				
	трансформаторное	конденсаторное	кабельные		
			МН-2	С-220	П-28
Температура застывания, "С (не выше)	-45	—45	-45	—30	-10
Температура вспышки, °С (не ниже)	135	135	135	180	240
Вязкость кинематическая при 20°С, Ю'® м^/с	17-26	30-45	37	800	2000
р при 20°С, Ом-м	10П_1012	1012-1013	10I2—1013	]013—1014	10"—1012
г, при 20Х	2,1-2,4	2,1-2,3	2,2—2,3	2,1-2,2	2,2-2,4
tg В при 50 Гц и 20°С	0,0005-0,002				
То же при ЮОТ		<0,005	0.003	0,003	0,025
£пр при 50 Гц и 20"С, МВ/м	12-26	20-25	18-20	20-24	14-18

Продолжение табл. 23.6

Характеристика	Касторовое	Октол	дибутилсебацинат	Вазелин конденсаторный нефтяной
Температура застывания, °С (не выше)	— 15-^ 17	-12	—8	*t* каплепадения 37° С
Температура вспышки, °С (не ниже)		165	180	
Вязкость кинематическая при 20°С, 10"^ м^/с	130 (при 50° С)	***100*** (при 100= С)		
р при 20°С, Ом-м	108_10U	10I2	108—10» (при 50° С)	1012—1013
Е; при 20Х	4,0-4,5	2,2—2,4	4,2-4,3	3,8-4,0
tg6 при 50 Гц и гох	0,02	0,0012	0,80 (при 1 кГц и 50°С)	0,0002 (при 1 кГц)
То же при 100°С				
£пр при 50 Гц и 20°С, МВ/м	14-16	16-17	16	20—22

1. Дибутилсебацинат применяется

Таблица 23.7. **Характеристики хлорированных жидких диэлектриков** [9]

Характеристика	Трихлордифенил	Совол	ГХБД (гексахлорбутапиен)	Трихлорбензол (ТХБ)	Совтол-Шта-	Гексол (ДО % сово-
Температура застывания, С	— !8	5	-21	-16	—7	-60
Температура начала кипения при 0,1 МПа, °С	320	350	212	215	221	215
Вязкость кинематическая при 20°С, 10-~ mVC	126	1800	2	1,5	650	4
р при 90°с, Ом-м	>3-10i'	>5-10i'	>5-101»	>7-108	>8-108	>1,3-101»
при 90°С	4,5	4,1	2,3	3,3	4,3	2,7
tg 5 при 50 Гц и 90 С	<0,025	<0,015	<0,003	<0,150	<0,100	<0,010
Еир, МВ/м, не менее	20 при 65° С	20 при 65° С	20 при 20° С	16 при 20 С	20 при 65° С	24 при 20° С

Таблица 23.8. Характеристики кремнийорганических жидких диэлектриков [9, 23]

Характеристика	ПМСЖ			ПЭСЖ		ПМФСЖ		П.\(Ф)ОСЖ	
	ПМС-10	П,\1С-20	iIМС-30	пэс-д	№ 3	ФМ-5	ФМ-1322	ФС-5	ФС-56
Температура застывания, "С	- 6 0	-СО	—60	- 6 0	- 7 0	- П О	- 7 0	— 100	- 9 0
Температура вспышки, °С	170	U 0	200	150	125	200	200	200	**3** 0
Вязкость кинематическая при 20° С, 10-" м^/с	10	20	50	80—180	15	15,7	24,5	18	720
}g6 при 20° С	0,0008—0,0010			0,0003		0,0020	0,0016	0,0200	
р при 20°С, Ом-м	1012				10"	10"	10"	5- Ю'о	
Е, при 20° С	2,6-2,7			2,4-2,8	_	2,8	2,7	5,4	6,3

лсилоксанозые жидкости; ПЭСЖ — полиэтилсилоксановые жидкости; ПМФСЖ — лолиметил-фенилслоксановые жидкости; ПХ(Ф)ОСЖ — полихлор(фтор)органосилоксаиоозые жидкости.

Таблица 23.9. Характеристики фторорганических жидких диэлектриков [9, 23]

Наименование	Тов'пература, °С		МВ/м		при 25° С и 100 Гц	**tg 6, 10—» при 25° С и 100 ГЦ**	f при 25° С. **Ом-м**
	кипения	замерзания	жидкости	пара при 0,1 МПа			
Фреон-**114**	3,6	- 9 4	19,3	**9.8**	2,26	1	10М-101'> при 0" С
Фреон-113	47,6	- 3 5	**12,2**	11,0	2,41	1	10"
Фреон-215	74,0	**- 8 0**	**12,6**	12,6	2,76	6	**10"**
Фреон-212	**92,8**	**23,8**	12,6		2,52	**2**	**1012**
Фреон-214	114,0	**—92,8**	**11,8**	13,0	2,78	**2**	10"

Таблица 23.10. **Электрические характеристики жидких диэлектриков высокой степени чистоты гри 20" С** [22 , 23]

Название жидкостей		МВ/м
к-Гексан	1,88	86,8
к-Гептан	1,93	84,0
Циклогексан	2,04	83,0
Тетрахлорурглерод	2,24	81,0
Бензол	2,28	78,4
Толуол	2,39	78,6
Тетрахлорэтилсн	2,46	77,6
Гексахлорбутадиен	2,55	89,0
Тршюрэтилен	3,44	67,0
1,2,4-Три хлорбензол	3,98	62,0
Диэтилэфир	4,38	58,0
Хлороформ	4,89	54,5
ж-Дихлорбеизол	4,90	53,8
Бромбензол	5,31	49,9
Хлорбекзол	5,54	49,9
1,1, 2,2-Тетрахлорэтан	8,08	35,5
Метиленхлорид	8,56	32,5
орто-Дихлорбензол	9,43	31,2
! ,2-Дихлорэтан	10,03	27,5
Паральдегид	15,06	18,2

и т. п.) являются ионными полупроводниками с 10® Ом-м. Молиопная электропроводность обусловлена такими носителями, как заряженные коллоидные частицы (мапионы) — коллоидная вода, смолистые вещества, мыла и пр.

Примеси ухудшают и другие электрические характеристики жидкостей (tg б, £пр). Относительно менее чувствительна к примесям величина е^. Теории пробоя жидких диэлектриков построены в зависимости от типа примесей, определяющих механизм развития пробоя [2, 21,

В табл. 23.6 приведены характеристики некоторых жидких органических природных и синтетических диэлектриков. К природным относятся нефтяные масла: трансформаторное, конденсаторное и кабельные (маловязкое МН-2, С-220 средней вязкости и высоковязкое П-28), а также касторовое масло и конденсаторный вазелин; к синтетическим — полиолефиновая жидкость октол и диэфиры, к которым принадлежит дибутилсебацинат. В табл. 23.7, 23.8 и 23.9 приведены характеристики синтетических жидких диэлектриков на основе хлорированных углеводородов, кремнийорганических и фторорганических соединений. Подробно свойства жидких диэлектриков рассмотрены в [9, 23—26].

Специальной физической и химической очисткой можно довести р неполярных жидкостей до 10'"—1018 Ом-м, а £пр — до 140—260МВ/М [21]. В табл. 23.10 представлена зависимость электрической прочности fпр от бг для высокочистых жидких диэлектриков, применяемых в качестве растворителей и для других целей.

23.4. Твердые диэлектрики

Природные смолы и синтетические полимеры (высокодюлекулярные соедштения) применяют для полученпя электроизоляционных лаков, эмалей, компаундов, пластмасс, пленочных, волокнистых п других материалоп. Природные смолы и синтетические полимеры бывают термопластичные (после действия нагрева не теряют способности плавиться и растворяться в подходящих растворителях) и термореактивные (после нагрева становятся неплавкими и нерастворимыми). Синтетические полимеры получаются с помощью реакций двух типов:

Таблица 23.11. Свойства природных смол при гСС и 50 Гц ГЭ]

Смола	Р. Ом . м		tg 6		Растворители
Шеллак	lOi-"—low	3,5	0,01 (0,001*1)	20-30	Этиловый спирт
Канифоль	1013-low	2,8	0,003	10-15	Жидкие углеводороды, растительные масла, спирт, скипидар
Янтарь	101'	2,8	0.001		На холоде не растворяется

После длительного нагрева.

Таблица 23.12. Характеристики термопластичных полимерных диэлектриков и материалов на их основе при 20°С [10, 12, 28]

			tg 6 при 50 Гц	
Полиэтилен	101»	2,2—2,3	(2—6)10-^ при 108 Гц	25-60
Полипропилен	1014_1016	**2,2**	(2-5)-10-^ при 106 Гц	25-40
Полистирол	10M_1016	2,4—2,6	(2-8)-10-^ при 108 Гц	20-25
Полистирол ударопрочный	1013—low	2,6—2,7	(2—3)-10-3 при 10« Гц	23-25
Политетрафторэтилен (фторопласт-4)	1015-1018 (до 150'С)	1,9-2,2	<1-10-4 (до 1010 Гц)	25-27 при rf = 4 мм
Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3)	1016	3,0	1,5-10-2	13-15 при d = 4 мм
Поливинилхлоридный пластикат изоляционный	101"—1012	4-8	(5—8)-10-2	20-50
Винипласт (жесткая пластмасса на основе поливинилхлорида)	ICV^—IQW	4,0		25-60
Полиметилметакрилат (органическое стекло, плексиглас)	1010-ioii	3.6	**0,06**	15—25
Полиформальдегид	1012—1013	3.7	(3-4). 10-3	
Полиэтилентерефталат (лавсан)	1018—1014	3,1-3,2	(2—3)-10-3	25
Поликарбонат (дифлон)	low—1016	3,0-3,1	(2-3)-10-3	140—180 (пленка)
Полиамиды:				20—25 (у пленки 180)
капрон	1011-1012	4.5	**0,06-0,1**	20-22
анид (нейлон)	1012—1013	4.6	0,04	20-25
фенилон	1012—1013	4,5	**0,02**	18—22 (у пленки >100)
Полиимид (полипиромеллитимид)	low-1016 10'®—1012 (при 250 Х)	3,0—4,5	(1-5)-10-3 (2—6)-10-3 (при 250'С)	100—300 (пленка)

Таблица 23.13. Свойства терморективных электроизоляционных пластмасс при 20''С[9—12]

	р. Ом - м		tg 6 при 50 Ги	МВ/м	
Э1-340-02; Э2-330-02; Э8-361-63; Э9-342-73; Э10-342-63; Э11-342-63; Э15-121-02	**101»— 10»**	**7,5—9,5**	**0,08**	**13—20**	Связующее — новолачная и резольные феноформальдегидные смолы (или их модификации); наполнитель — органический, минеральный, их смесь
Э3-340-65; Э4-100-30; Э5-101-30; Э6-014-30 (высокочастотные)	**1011-1012**	**6—8**	**0,010—0,012 при 106 рц**	**15—20**	
В1, В2, В3, В4, В5 (с повышенными электроизоляционными свойствами)	**1010-1012**	**4—6**	**0,03-0,05**	**12—14**	Связующее — мочевино- и меламиноформальдегидные смолы; наполнитель — органический, минеральный, их смесь
Д1, Е1 (с повышенны\<и дугостойкостью, теплостойкостью и механической прочностью)	**1010—10"**	**4—5**	**0,05-0,06**	**5—10**	
АГ-4 (для работы в интервале температур от —196 до -ЬгООХ и в тропических условиях)	**1010-1011**	**5-8 при 106** Гц	**0,02—0,05 при 106 Рц**	**13—18**	Связующее — модифицированная фенолформальдегидная смола; наполнитель — стекловолокно

Продолжение табл. 22.15

	р. Ом . м		tg 8 при 50 Гц	МВ/м	
КМК-2I8; ВПМ-1; ПК-9; КФ-9; КФ-10 и **др.** (рабочие температуры 200-350 °С, тропикостойкие)	10"—1013	3 - 6	0,004-0,02	4 - 7 (У КФ до 20)	Кремнийорганические смолы минеральным наполнителем
Эбонит		2,8—3,5	0,004—0,013 при 10" Гц	20—35	«Твердая резина», вулканизированная 30—35% серы
Эскапон	10М_101=	2,7—2,9	0,0005 при 10" Гц	30-35	Синтетический каучук СКВ, полимеризованный без вулканизаторов

Таблица 23.14. **Свойства основных видов слоистых пластиков при** 20**°С** [9, 29]

	р. Ом • м	р^. Ом	V	tg 6 при 50 Гц	*ЧЛ*	
Гетинакс низковольтный (марки I, II, III, IV, VI)	**1010—1011**	**1012**	7 - 8	0,10-0,40	20-35	Целлюлозная бумага — наполнитель.
Гетинакс высоковольтный (V)	ЮН	**1013**	7 - 8	0,015	27-30	Связующее — резольные смолы фенолформальдегидного типа и эпоксидная смола
Гетинакс высокочастотный (VII, VIII)	**1010-1011**	1012- **10"**	7 - 8	0,020—0,025 при 10® Гц	28-40	
Текстолит низковольтный (марки А, Б, Г)	**10^-109**	**1011- 1012**	8	<0,6	4,5—12	Хлопчатобумажная ткань и лавсановая (ЛТ) — наполнитель.
Текстолит высокочастотный:						Связующее — резольные смолы фенолформальдегидного типа иэпоксиднофенольная смола (ЛТ)
марки ВЧ	**1010**	**1012**	7 - 8	0,05 при 10" Гц	8-16	
марки ЛТ	1012	**1013**	4	0.03 при 10" Гц	25-32	
Стеклотекстолит низковольтный, рабочая температура 130 °С (марки СТ,СТ-Б, СТ-1)	**1№-1011**	**1011-1013**	-	<0,4	10-25	
То же, рабочая температура 155 (марка СТ-П)	10"	**1012-1013**	-	-	12—20	
Стеклотекстолит с рабочей температурой 155 °С;						Стеклоткань — наполнитель, связующее — фенолформальдегидные, эпоксидные и кремнийорганические смолы
высоковольтный (СТЭФ-1)	**10"**	**1013**	5 - 6	0,03—0,05	20-30	
высоковольтный и высокочастотный (СТЭФ)	**1011— 1012**	**1013—1014**	5 - 6	0,003—0,005	20-30	
Стеклотекстолит с рабочей температурой высоковольтный (СТК)	**1012—1013**	–	–	0,001—0,005	18-25	

Таблица 23.15. **Характеристики кстроизоляционных компаундов** при 20 °С [9—11, 30]

Марка компаунда и тип	Температура размягчения.	Холодостойкость, (не выше)	Объемная усадка, % (не более)	р. Ом . м		tgs при 50 Гц	
		Пропиточные					
225 (битумный)	97—102	—25	8,0-8,5	1011—1012	2,8-3,2	0,02	20-22
КГМС-1 (полиэфирный горячего отверждения)	250	—60	6 - 7	1011—1012	6	0,02—0,04	18-22
КГМС-2—тоже, но более эластичный	250	- 6 0	8—10	1011— 1012	6	0,02-0,04	18—20

Продолжение табл 23.17

Марка компаунда и тип	Температура размягтения.	Холодо-стойкость (не выше)	усадка, % (не бо-лее)	р. Ом . м		tg 8 при 50 Гц	1 - й
КП-18 (полиэфирный горячего отверждения)	Не размяг-чается	—50		1010—1011	4,4—5,0 при 10«Гц	0,02-0,03 при 103 Гц	28-33
Д1 (эпоксидный горячего отверждения)	То же	- 5 0	0,5 - 1	1011—low	4,0 при 108 Гц	0,01-0,02 при 10" Гц	28-30
К-67, К-67Ф (кремнийорганические горячего отверждения)		- 6 0	5 - 8	1013-10"		0,005-0,015	20-22
Пропиточно-заливочные							
МБК-1 (метакриловый твердый)	250	- 6 0	0,5	1011-1012	3,1—3,5	0,05—0,07	20-25
МБК-2 (то же менее твердый)	250	- 6 0	0,5	1010-1011	4,0-5,6	0,03-0,04	17-20
МБК-3 (то же эластичный)	250	—60	0,5	1010-10Ч	4,5-5,2	0,03-0,04	16-18
К-168 (эпоксидный холодного отверждения)		—60	0,5—1,5	1010 — 1012		0,02-0,04	25-30
К-293 (то же горячего отверждения)		- 6 0	1 - 2	1010- 1012		0,05-0,08	20-25
Заливочные							
К-30 (полиуретановый горячего отверждения)	Не размяг-чается	- 8 0	3 - 4	108—1010	6	0,02-0,03	27-30
К-31 (то же)	То же	- 8 0	3 - 4	1012 — 1013	5	0,05-0,07	27-30
Виксинт К-18 (кремнийорганический холодного отверждения)		- 6 0	2 - 3	1011-1012	3,0	0,01-0,02	15-18
МК-45 (маслоканифольный)	45-48	—8	6—7	109—1010			12-16
МБ-70 (битумный)	70—73	- 1 0	8 - 9	1010—10"			14-16
МБ-90 (битумный)	90-92	- 1 0	8 - 9	1ОЮ-1011			14-16
МБМ (битумно-масляный)	55-60	—45	7 - 8	1010 —ЮН			15-17

Таблица 23.16. Характеристики волокнистых материалов (II)

Вид материала	Марка	Толщина, мм	Механические характеристики	tg 8 -при 50 Гц)	Пробивное напряжение слоя. В. не менее	£„р. мв/м
			Разрывная длина, м			
Бумага конденсаторная обычная	**КОН-1**	0,010—0,030	8000	СО,26 при 100°С	**зео-620**	—
	КОН-2	0,004—0,030	**8500**	<0,32 при 100°С	240-680	–
Бумага конденсаторная специальная улучшенного качества	**скон-1**	0,010-0,030	8000	<0,20 при ЮО°С	**380-620**	–
	СКОН-2	0,004-0,022	8500	<0,24 при 100°С	270-590	–
	СКОН-3	0,005-0,022	8500	<0,32 при 100	300-610	–
Бумага конденсаторная с малыми диэлектрическими потерями	МКОН-08	0,010—0,020	8000	<0,12—0.16при 120 °С	320—470	—
	МКОН-1	0,008-0,030	8000	<0,16-0,20 при 120	340-620	–
	МКОН-2	0,006-0,030	8000	<0,22-0,28 при 120 Х	300-680	–
	МКОН-3	0,006-0,015	8000	<0,26-0,32 при 120 Х	310-520	–
			Разрывное усилие, И			
Бумага кабельная	**К**-080	0,080	**83,4**	Не нормируется	Не норми-**руется**	—
	к-120	0,120	127,5			
	к-170	0,170	171,7			
Бумага кабельная многослойная	**км**-120	**0,120**	142,2	То же	То же	—
	КМ-170	0,170	186,4			
Бумага кабельная многослойная упрочненная	КМП-120	0,120	152,0	«	»	—
	КМП-170	0,170	196,2			–
Бумага кабельная высоковольтная многослойная	КВМ-080	0,080	**74**	<0,0022 при 100 Х	»	–
	кем-120	0,120	**142**	<0,0022 при 100 "С		
	кем-170	**0,170**	186	<0,0022 при 100		–

Продолжение табл. 22.15

Вид материала	Марка	Толщина, мм	Л^сханнческие характеристики	tg 8 (при 50 Гц)	Пробивное напряжение слоя, В, нс менее	£пр, МВ/м
Бумага кабельная высоковольтная многослойная стаиилизированная	КВМС-080 КВМС-120 КВМС-170	0,080 0,120 0,170	69 108 147	<0,0018 при 100 <0,0019 при 100"С <0,0019 при 100 °С	Не нормируется	— —
Бумага кабельная многослойная стабилизированная уплотненная	КВМСУ-080 КВМСУ-120	0,080 0,120	98 137	<0,0026 при ЮО'С **<0,0026 при 100**	То же	—
Бумага телефонная	КТ-50	0,050	60,8	Не нормируется		—
Бума! а электроизоляционная крепированная	э к т м	0,44	44,2	То же		>40 в масле при (90±5) "С
Бумага кабельная полупроводяшая уплотненная одноцветная с включением в композицию	КПУ-80 КПУ-120	0,080 0,120	78,4 117,6	р = 103ч-9-10«Ом-м		
Бумага кабельная полупроводящая двухцветная уплотненная с включением сажи в композицию одного слоя	КПДУ-80 КПДУ-120	0,080 0,120	94 127,4	р^=5 • 10-i Ом		
			Предел прочности при растяжении в продольном направлении, МПа			
Картон электроизоляционный для работы в воздушной среде	ЭВ э в с э в п э в т ЭВА	0,10-3,0 0,20—0,40 0,10; 0,20 0,10—0,50 0,15	83-98 127 127 118 118	**Не нормируется**		8-12 12 12 **12-13** **11**
					Испытательное напряжение, кВ	
Картон электроизоляционный для работы в трансформаторном масле	АМ А Б в Г	2,0; 2,5; 3,0 2,0; 2,5; 3,0 1,0—6,0 2,0; 2,5; 3,0 0,5-3,0	39 39 49 59 34-39	То же	40-50 40-50 31-90 55-70 19-57	
Фибра листовая электротехническая и техническая	ФЭ ФТ	0,4-3,0 0,6-25,0	69-74 29-49	Тоже		>3,5-7,0 >2-4

усилие прикладывается при которой бумага разрывается под действием собственной

Таблица 23.17. Характеристики лакотканеи [11]

Марка лакоткани	Основа лакоткаии (ткань)	Пропиточный состав			g s l f 4 1 l i i i	ё Р й ё g & E g.
ЛХМ-105	Хлопчатобумажная	Масляный лак	0,15; 0,17; 0,20; 0,24; 0,30		4-9,5	1,5-4,0
ЛХМС-105	То же	То же	0,17; 0,20; 0,24	44-51	4,5-7,4	1,9-3,5
ЛХММ-105			0,17; 0,20; 0,24	50-64	4,8—9,2	2,0—4,0

Продолжение табл 23.17

Марка лакоткани	Основа лакоткаии (ткань)	Пропиточный состав	Номинальная толщина.	и E.E ill g P. . 5 i f	1 i S B	кв i f	кв I S Ш	и g 1 1
	Хлопчатобумажная	Битумно-масляный лак	0,17; 0,20; 0,24	58-80	Ю'i	4,5-9,2	2,0-3,6	105
ЛШМ-105	Шелковая	Масляный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15	7-24	10»	2,3-8,5	1,4-3,8	105
ЛШМС-105		То же	0,04; 0,05; 0,06; 0,10; 0,12	11-25	10»	0,4—9,3	2,0-4,2	105
ЛКМ-105	Капроновая		0,10; 0,12; 0,15	20-30	10»	3,3-7,8	1,7-3,4	105
ЛКМС-105	»		0,10; 0,12; 0,15	20—30	10»	3,e-9,3	2,0-4,2	105
ЛСМ-105/120	Стеклянная		0,15; 0,17; 0,20; 0,24	85-170	10»	3,f-8,0	1,5-4,2	120
ЛСММ-105/120			0,17; 0,20; 0,24	95-170	10»	4,0—9,2	2,3—4,6	120
ЛСЛ-105/120		Бутадиен-стирольный латекс	0,15; 0,17; 0,20	95-iE0	10'-	3,2-6,8	1,3-3,0	120
ЛСЭ-105/130		Эскапоновый лак	0,12; 0,15; 0,17; 0,20 0,24	70-170	10'^	2,6-9,6	0,7—3,6	130
ЛСБ-120/130		Битумно-масляно-алкидный лак	0,12; 0,15; 0.17; 0.20; 0,24	70-170	10'^	2,6—10,8	0,9-4,1	130
ЛСП-130/155		Полиэфирно-эпоксидный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15 0,17	35-130	10'»	0,8-9,0	0,6-3,5	155
ЛСК-155/180		Кремнийорганический лак	0,05; 0,06; 0,08; 0,10 0,12; 0,15; 0,17 0,20	20-150	10l=	1,0—9,0	0,6-5,0	180
ЛСКР-180		Кремнийорганическая резина	0,12; 0,15; 0,17; 0,20	70-150		0,7—4,9	0,6-2,7	180
ЛСКЛ-155		Кремнийорганический лак липкий	0Л2; 0Л5	70-105	10l2	0,8-0,9	–	155
ЛСУ		Полиуретановый лак	0,13 0,15; 0,17	90-130	10"	5,5-9,5	3,0-5,5	155
ЛСК-2		Кремнийорганическая эмаль	0,12; 0,15: 0,20	50-120	10»	2,5—7,5	1,3—4.2	180
ЛСК-5		Полупроводящая кремнийорганическая эмаль	0,12; 0,15; 0,20	70—150	r. 106 Ом	–	—	180

Таблица 23.18. Характеристики электроизоляционных слюд при 20"С [9]

Разновидность слюды	Нагревостойкость, °С	р Ом . м	Р^. Ом		tgO при 50 Гц	tgO при 10" Гц	£пр. МВ/м
Мусковит	500-600	10«-10"	10»- 10'2	6,1—8,4	0,0004-0,008	0,0001-0,0004	100-250
Флогопит	800-1000	10»-10'=	10l0— 10»	5,5—6,7	0,006—0,015	0,0002-0,006	70-150
Фторфлогопит (синтетическая слюда)	1000-1050	10l=- 10"	10l«— 10l=	6,1—7,5		0,0001-0,0003	100-250

Таблица 23.19. Характеристики некоторых видов миканитов и микалекса (9—11]

Наименование	Марка	Виды слюды и склеивающего вещества	Толщина,		при 20 °С, МВ/м	Нагревостойкость. °С
Миканит коллекторный	КФШ	Флогопит обычный; шеллак	0,4-1,5	10»—1012	19-22	130
	КФг	То же глифталевая смола	0,4—1,5	1012-1013	19-22	130
	КФП	» ; полиэфирная смола	0,7-1,5	10»-1012	19-22	155
	КФА	Флогопит нагревостойкий; аммофос	0,7-1,2	10»-1012	19-22	>180

Продолжение табл. 22.15

Наименование	Л^ярка	Вид слюды и склеивающего вещества	Толщина,	р при 20 °С, Ом • м	£„р||р„20»с. МВ/м	НагрсКОСТОбкость, °С
Миканит прокладочный	ПМГ ПФГ п е г ПФК	Мусковит, флогопит обычный; их смесь; глифталевая смола Флогопит нагревостойкий, кремнийорганическая смола	0,5-1,0 0,15-1,0	10"- 1012 10io_iou	16-23 16-38	130 180
Миканит гибкий	г м с ГФС	\ Мусковит, флогопит; масляно- I глифталевый лак (светлый)	0.15	1011- 1012	20—30	130
	г м ч ГФЧ	Мусковит, флогопит; битумно-масляный лак (черный)	0,2—0,5	1011—101-'	20—30	130
	ГМС-ББ ГФС-ББ ГМЧ-ББ ГФЧ-ББ	Мусковит, флогопит; светлый и черный лаки. Миканит оклеен бумагой с двух сторон	0,2-0,5	1011- 1012	16-23	130
	ГФК	Флогопит; кремнийорганический лак	0,2-0,5	1011- 1012	19—25	180
Микалес		Порошок слюды мусковит — наполнитель, легкоплавкое стекло — связующее	4—15	1010— 1012	13-18	300-350

Таблица 23.20. Характеристики некоторых видов слюдинитов и слюдопластов [9—11]

HaiaienoBaraie	Марка	Вид склеиБагащего материала, подложки	Толщина, мм		m/II	Нагрево-СТОЙКОЛЬ 'С
Слюдинит коллекторный	к с ш	Шеллак	0,45—1,2	1010-1012	28-35	130
Слюдинит гибкий	ГСП	**Полиэфирный лак**	0,15-0,30	1011 — 1012	17—23	130
	г^сп	**То же; стеклоподложка с одной стороны**	0,10, 0,15	1011-1012	20-22	130
	г^сп	**То же; стеклоподложки с двух сторон**	0,2-0,3	1011—1012	28-30	130
	ГСП-ПЛ-10	**Полиэфирный лак; полиэтилентерефталатная пленка толщиной Юмкм с одной стороны**	0,15; 0,20	10"—1012	30-32	130
	ГСП-ПЛ-20	**То же, 20 мкм**	0,20; 0,25	1011-1012	28—30	130
	ГСП-ПЛ-50	**То же, 50 мкм**	0,25; 0,30	1011—1012	26-28	130
	ГlСК	**Кремнийорганический лак; стеклоподложка с одной стороны**	0,10; 0,15	1011—1012	20-22	155
	г,с к	**То же, стеклоподложки с двух сторон**	0,2-0,3	1011—1012	28-30	155
	Г^ск и	**Кремнийорганический лак нагревостойкий; стеклоподложка с одной стороны**	0,10; 0,15	1011 — 1012	20-32	300
	ГгСКН	**То же; стеклоподложки с двух сторон**	0,2-0,3	1011 — 1012	26-28	300
Счюдопласт коллекторный	КИФШ	Шеллак	0,4—1,5	1010 —1011	22-26	130
	КИФП	Полиэфирная смола	0,4-1,5	1010 — 104	22-24	155
	КИФН-С	Нагревостойкое связующее	0,4-1,5	1011-1012	24-26	>180
	КИФК	Кремнийорганическая смола	0,4-1,5	1011-1012	24-26	>180
Слюдопласт прокладочный	ПИФШ	Шеллак	0,5-1,5	1011-1012	20-28	130
	ПИФША		0,5-1,5	1011 — 1012	20—28	130
	ПИФТ	Алюмофосфат с кремнийорганическим лаком	0,5-1,5	1011-1012	20-28	>180

Продолжение табл. 22.15

Наименоваипе	Марка	Вид склеивающего материала, подложки	Толщина, мм	р при 20 •С. Ом • м		Нагревостойкость.
Слюдопласт композиционный (гибкий)	ГИТ-ТС	Триэтиленглифталевый или глифталевый лак; подложки из стеклоткани и стеклосетки	0,25; 0,30	104 —10'=	10-19	130
	гип-тс гпп-сс гик-тс гик-сс	Полиэфирный лак; подложки из СТРК-лоткани и стеклосетки или обе подложки из стеклосетки	0,35-0,45	1011-1012	10-19	155
		Кремнийорганический лак; подложки из стеклоткани и стеклосетки или обе подложки из стеклосетки	0,35-0,45	юн—1012	9-18	180

Таблица 23.21. Свойства электротехнических кварцевых стекол [9]

Средний ТК линейного расширения, , в интервале температур,		
20-50	4,0-10-'	
120-420	6,0-10-'	
420-1200	5,0-10-'	
р, Ом • м, при *t*, °С:		
20	10"	1013
200	10'2	1010
600		10^
1000		102
tgB, 10-«, при 10l« Гц и 20 X		3,7
То же при 1000		3,0
£пр, МВ/м, при *t*,		
20		
200		
600		

Таблица 23.22. Свойства некоторых электроизоляционных стекол [9]

Марка стекла	Средний ТК линейного расширения интервале	при 20 °С		tg8, ю-". при: 20		р, СКt - м	
		я 2 р.	г 1 1	£ S 1	Й 1 1	S g	о" 1 1
С5-1	5	3,81	3,80	1	1	—	-
С40-1	40,0±1,5	5,10	4,70	22	53	-	-
С48-1	48,0±1	5,40	4,90	22	65	-	-
С87-1	87,0+1	7,20	6,80	13	62	-	-
С63-1	63,0+2	14,0	12,0	18	131	3-ЮЧ	6,2-10'
С77-1	77,0+2	13,0	11,0	12	78	9-1011	6,3-10'

Таблица 23.23. Свойства некоторых марок технических ситаллов [9]

Марка ситалла	Средний ТК линейного расширения в интервале 300-400 «С, 10-'-'С-'	Е^ при25°С при 10- Гц		tg г, 10-^ при 25 °С при 10- Гц	при 10'" Гц	Ом^'м	Р^. Ом	Мв7м
С-15-12 (СТЛ-1)	1,2	9,7		461		2,2-1010	1,8-10"	70,7
С-12-14 (СТ.П-5)	7,0	7,4	7,05	32	153	4,1-10"	1,9-1012	27,0
ТС-81 (СТ.П-8)	17	7,0	6,42	41	64	3,3-1010	2,35-10"	29,6
АС-05-С-023 (СТЛ-10)	120	5,7	5,40	21	120	4,6-1010	1,15-10"	85,3
СТ-50-1 (СТМ-2)	50	8,3	7,90	15	45	7,1-1010	4,56-10"	47,2
СТ-50-2 (СТМ-3)	50	5,6	5,50	200	5	3,2-1010	1,67-10"	27,9
АС-05-336 (СТБ-2)	48	5,1	4,96	10	17	4,9-10"	1,04-1012	65,9

Таблица 23.24. Основные характеристики электрокерамических материалов [10]

	Механические характеристики				Электрические характеристики при 20 "С			
	Плот- кг7м»	Предел прочности при растя-	изгибе, МПа	ТК линеГ. иого расширения 10-8° С-'				
Электрофарфор	2200	30—55	60—110	1,8-2,2	3,5—5,0	10"—IOW	5-8	0,022—0,025	30-32
Ульт^#арфор УФ-46	3200	50-60	200—250	2,5—2,8	5,0-5,5	1012_1013	8,0-8,8	0,0005-0,001	30-36
Стеатит СК-4. ТК-21	3000		170-190	3,0-3,5	6,0-6,4	101з_10»	6,5-7,0	0,001-0,003	40—42
Кордиерит	2800		70-88	2,0-3,0	2,0-2,3	101-1010	5-6		4,5-6,0

Примечание. Механические характеристики относятся к неглазурованным образцам. У глазурованного фарфора и характеристшш выше на 15—20%. Значения TJ< расширения даны для интервала температур 20—100 °С.

полимеризации и поликонденсации. Некоторые полимеры последнего типа по аналогии с природными материалами также называют смолами (например, фенолформальдегидные смолы, полиэфирные, эпоксидные). В трехтомной энциклопедии полимеров представлены подробные сведения по всем разделам химии, физики и технологии полимеров и полимерных материалов (пластмасс, каучуков и резин, химических волокон, пленочных материалов, лаков, красок и др.) [27]. Свойства природных смол приведены в табл. 23.11.

Пластмассы — композиционные материалы, основой которых являются полимеры, определяющие главные свойства и выполняющие роль связующего, соединяющего все компоненты материала в монолит. Остальные компоненты — наполнители, пластификаторы, стабилизаторы и другие — при введении в иеполяр'ные полимеры снижают их электроизоляционные свойства. Поэтому пластмассы на основе таких полимеров — отличных диэлектриков—состоят практически только из связующего. В табл. 23.12 приведены свойства термопластичных полимерных органических диэлектриков и материалов на их основе, в табл. 23.13 — свойства термореактивных пластмасс, а в табл. 23.14 — слоистых пластиков с листовым (рулонным) наполнителем

Электроизоляционные компаунды (составы)- твердеющие материалы. При технологическом применении (пропитке, заливке) находятся в жидком состоянии. В рабочем состоянии они тверды. Их свойства приведены в табл. 23.15

Свойства волокнистых материалов — бумаг (в том числе полупроводящей), картона **и** фибры указаны **в табл.** 23.16, **а** лакотканей **(и** полупроводящей тоже) — **в** табл. 23.17.

Слюда — неорганический диэлектрик. В табл. 23.18 приведены свойства ваи{нейшх видов слюды. Миканиты—клеевые листовые материалы на основе слюды, которые могут иметь и волокнистые подложки. В табл. 23.19 приведены свойства некоторых видов миканитов и микалекса (пластмассы на основе слюды). Заменителями миканитов являются материалы из слюдяных бумаг — слюдиниты и слюдопласты; свойства некоторых их видов приведены в табл. 23.20. Слюдинитовая бумага получается из отходов слюды мусковит, а слюдопластовая — из отходов слюды флогопит.

Стекла — неорганические аморфные вещества, представляющие собой обычно системы различных окислов. В табл. 23.21 указаны свойства кварцевых стекол, а в табл. 23.22 — ряда других электроизоляционных стекол

Ситаллы — стеклокристаллические материалы, получаемые путем кристаллизации стекол специального состава. Свойства технических ситаллов некоторых марок даны в табл. 23.23.

Электротехническая керамика — камнеподобный материал, получаемый спеканием массы заданного состава и состоящий из кристаллической и аморфной фаз. Свойства распространенных электрокерамических материалов приведены в табл. 23.24.

23.5. Активные диэлектрики

Сегнетоэлектриками называют диэлектрики, обладающие **в** определенном температурном диапазоне спонтанной поляризацией. К своеобразным свойствам сегнетоэлектриков относятся: высокое и сверхвысокое значение Ег резкая зависимость е, от температуры с острыми пиками **в** точке Кюри; резкая зависимость **е**^ от напряженности электрического поля. Эти свойства используются в устройствах на основе сегнетокерамических материалов. На рис. 23.8 приведена зависимость ег титаната бария от температуры, откуда видно, что при 125 °С у этого материала существует точка Кюри. На" рис. 23.9 для этого же материала показана **зависимость е,** от напряженности

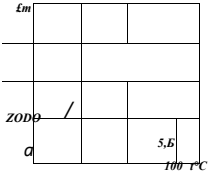


Рис. 23.8. Зависимость е, титаната бария от температуры при различной напряженности электрического поля [32J

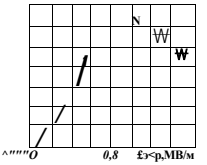


Рис. 23.9. Зависимость е, титаната бария от напряженности электрического поля при температуре 22°С [32]

электрического поля £эф. На основе сегнетокерамики созданы вариконды — нелинейные диэлектрические конденсаторы, емкость которых резко изменяется при изменении воздействующих на них переменных и постоянных электрических напряжений. Свойства сегнетокерамики для вариконд0в приведены в табл. 23.25. Основными характеристиками вариконд0в являются: точка Кюри Гс; бн — начальная диэлектрическая проницаемость в слабом переменном электрическом поле (2—БкВ/м); коэффициент нелинейности по переменному полю K~ = епах/ен, где **бтах** — максимальное значение диэлектрической проницаемости в переменном поле (при £ = £тах); коэффициент реверсивной нелинейности по постоянному полю /<_=r^/ετιn, где диэлектрическая проницаемость в переменном поле при отсутствии смещающего постоянного поля, Emin — диэлектрическая проницаемость при том же переменном поле и значительном смещающем постоянном поле, когда е уже практически не зависит от смещающего поля.

Пьезоэлектрики — кристаллические диэлектрики, не имеющие центра симметрии, в которых под действием механических напряжений возникает электрическая поляризация (прямой пьезоэлектрический эффект), а под действием внешнего электрического поля — механическая деформация (обратный пьезоэлектрический эффект). Таким образом, с помощью пьезоэлектриков можно преобразовывать электрические сигналы в механические и наоборот. Между поверхностной плотностью заряда <2 образующегося при прямом пьезоэффекте на поверхности поляризованного кристалла, и механическим напряжением о существует прямо пропорциональная зависимость (7 = do, "причем знаки зарядов на электродах пьезоэлемента зависят от направления механических напряжений (сжатие — растяжение). Механическая деформация и в такой же зависимости находится с напряженностью внешнего электрического поля *Е* при обратном пьезоэффекте: «=dE, а характер деформации (сжатие или растяже-

ние) определяется направлением поля (полярностью напряжения, приложенного к электродам пьезоэлемента).

Коэффициент ***d*** (пьезомодуль) у одного и того же диэлектрика одинаков как для прямого, так и для обратного пьезоэффекта. **В** качестве пьезоэлектрических применяются материалы с ярко выраженными пьезосвойствами: пьезоэлектрические монокристаллы и пьезокерамика. Обычная сегнетокеракнка как изотропная среда не обладает пьезосвойствами. Для придания этих свойств сегнетокерамику поляризуют: выдерживают в нагретом состоя!" -• постоянном электрическом поле |33, 34 кторы спонтанной поляризованности доме: полем ориентируются, из изотропного тела зевращается в анизотропное, "обладающее 1Статочной поляризованностью Ро, напра! |й определеао поляризующим полем. Это появлению пьезоэффекта.

Помимо пьезомодуля, значение которого зависит от кристаллографического направления, для оценки пьезоэлементов применяют коэффициент электромеханической связи К, характеризующий эффективность преобразования механической энергии в электрическую и наоборот (при прямом и обратном пьезоэффекте), а также механическую добротность **Q**M, определяемую потерями на внутреннее трение в материале, от значения которой существенно зависит увеличение амплитуды колебаний элемента при резонансной частоте. Работоспособность пьезоматериалов определяется также значениями Sr, tg б и точкой Кюри ***Тс.***

Пьезокерамические материалы в зависимости от назначения делят на четырг класса.

Материалы класса I применяют для высокочувствительных пьезоэлементов, в частности, в режиме слабых сигналов, когда определяющим параметром является пьезомодуль.

Материалы класса II предназначены для применения в условиях сильных электрических полей и высоких механических напряжений. Дополнительным требованием здесь является малый tg 6 и высокая механическая добротность **Q**M.

Материалы класса III применяют для пьезоэлементов с повышенной стабильностью резонансных частот во времени и с изменением температуры, с высокой механической добротностью **QM,**

к классу IV относят материалы для высокотемпературных пьезоэлементов (с Тс выше 300 °С).

В табл. 23.26 приведены параметры некоторых промышленных пьезокерамических материалов. Их подразделяют на три типа:

Тип А. Материалы системы титаната бария (ТБ-1, ТБК-3, ТБКС).

Тип Б. Материалы системы цирконата-титаната свинца (ЦТС-19, ЦТС-21, ЦТС-22. ЦТС-23, ЦТС-24, ЦТС-300).

Тип В. Материалы ниобатной системы [НБС-1, НБС-3, (Ко,5Nao,5)Nb03].

Пьезомодуль измеряется в пКл/Н (1 пКл= Ю^^ Кл). Если направление остаточной поляризации Ро принять за ось 3, то пьезоэффект вдоль этой оси характеризуется пьезо.мод^лем d-^ при сжатии-растяжении материала вдоль оси 3, а пьезомодулем ds, — при деформации в перпендикулярной плоскости.

В<;ледствие высоких значений вг, tg б и малой **Q**m пьезокерамику нецелесообразно использовать на частотах выше 10 МГц. На ВЧ и СВЧ применяют монокристаллические пьезоэлектрнки, причем наиболее часто — кварц. Кристалл кварца — шестигранная призма, увенчанная двумя пирамидами (рис. 23.10). Для оценки свойств кварца используют прямоугольную систему координат. Пои этом оптическая

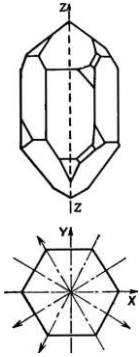


Рис. 23.10. **Кристалл правого** кварца **и его оси** [19]

Таблица 23.25. **Свойства сегнетокерамики для варикондов** [20, 31]

Материал		Ёц при 20 -С		^тах' кВ/м	К-	
ВК-1	75	2300—2500	6-8	150—200	*>2*	0,02
ВК-2	75	2000—2500	15-20	120-150	> 2	0,01
ВК-3	25	**10000—20000**	**1—2**	50—100		**0,03**
ВК-4	105	1800-2000	10-16	250-300	> 2	**0,015**
ВК-5	25	2000-3000	35-50	80—100	> 2	0,01
ВК-6	200	400—500	20—50	500—600		0,03
ВК-7	<20	2000—4000		—	> 2	0,001

Таблица 23.26. **Характеристики промышленных пьезокерамических материалов** [20]

Марка материала	Класс			tgs	Пьезомодули, пКл/Н		*К*	Ом
						ЙВ		
ТБ-1	I	120	1400	0,01	45-^78	100-190	0,2-0,36	100-300
ТБК-3	II	105	1200	0,02	43	77	0,25	>300
ТБКС	III	160	450	0,002	27	77	0,25	>350
ЦТС-19	I	290	1400	0,03	119	282	0,47	70
ЦТС-21	IV	410	550	0,02	27	67	0,20	100
ЦТС-22	III	330	800	0,02	50	100	0,20	>400
ЦТС-23	II	280	1050	0,007	100	200	0,43	>200
ЦТС-24	[I	280	1050	0,007	100	200	0,45	>200
ЦТС-300	III	330	1100	0,003	95	280	0,43	500
НБС-1	[I	265	1600	<0,02	67	167	0,28	150
НБС-3	III	270	1800	0,025	40	100	0,20	>300
(Ко.5Мао.5)МЬОз	IV	420	420	0,013	49	160	0,45	240

ось I проходит вдоль кристалла через вершины пирамид. Три оси называемые электрическими, проходят через вешшиы шестиугольника в плоскости, перпендикулярной оси Z. Три оси У, проходящие перпендикулярно сторонам того же шестиугольника, называют механическими.

Кристаллы кварца отличаются очень высокой механической добротностью (5-10^—10^ и выше у синтетических кристаллов) и малыми jHaneHHHMH tg б (не более 2-10-^) и ег (4,52—4,63), что обеспечивает работоспособность пьезоэлементов на высоких частотах, хотя пьезомодули кварца невелики (d,, = 2,31 пКл/Н, d,4 = = 0,7 пКл/Н). Значение коэффициента электромеханической связи K_y кварца невелико и составляет только 0,1. Пьезомодуль du определяет поляризацию вдоль оси *X* при деформации вдоль этой оси, а d a — при деформации сдвига в плоскости, перпендикулярной оси *X*.

Наиболее широкое применение находят пластины косых срезов кристалла кварца, отличающиеся термостабильностью частоты механических колебаний и другими полезными свойствами [9, 20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканави **Г. И.** Физика диэлектриков (область слабых полей). М.: Гостехиздат, 1949.

2. Сканави **Г. И.** Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: Физматтиз, 1958.

3. Теория диэлектриков/Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Воробьев, Б. М. Тареев. М.: Энергия, 1965.

4. Поплавке Ю. М. Физика диэлектриков. Киев: Вища школа, 1980

5. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1982.

6. Бёнинг П. Электрическая прочность изоляционных материалов и конструкций: Пер. с нем./Под ред. А. А. Воробьева. М.: Госэнергоиздат, 1960.

7. Техника высоких напряжений/Г. Н. Александров, В. Л. Иванов, К. П. Кадомская и др./Под ред. М. В. Костенко. М.; Высшая школа, 1973

8. Казариновский Д. М., Тареев Б. М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий. — 3-е изд. Л.; Энергия, 1980.

9. Справочник по атектротехническим материалам/ Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева, —2-е изд. М.: Энергия. Т. 1, 1974. Т. 2, 1974. Т. 3, 1976.

10. Электротехнический справочник/Под ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А Жукова и др. — 6-е изд. Т. 1. М.: Энергия, 1980.

11. **Электротехнические** материалы: Справочник/ В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. — 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1983.

12. **Справочник** по пластическим массам/Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина. — 2-е изд. М.: Химия, 1975. Т. 1, **Т.** 2.

13. Буц **В.** П., Железное М. **Т.,** Юринов М. М. Вакуумные конденсаторы. Л.: Энергия, 1971.

14. Слнвков И. Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1972.

15. Бабиков Л1. А., Комаров Н. С., Сергеев А. С. Техника высоких напряжений. М.: Госэнергоиздат, 1955.

16. Долгинов А. И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М.: Энергия, 1968.

17. Техника высоких напря;кений/П. В. Борисоглебский, Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ла опо:!ов и др./Под ред, Д. В. Разевига. М.: Госэнергоиздат, 19в3.

18. Техника высоких напрял;ений/Л. Ф. Дмоховская В. П. Ларионов, Ю. С. П!!нталь и др./Под ред. Д. В. з е в и г а. 2-е изд. М.: Энергия, 1976.

19. Казарновский Д. М., Яманов С. А. Радиотехни ческие материалы. М.: Высшая школа, 1972.

20. Электрорадиоматериалы/Б. М. Тареев, Н. В. Короткова, В. М Петров, А. А Преображенский/По.л ред Б. М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978.

21. Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков: Пер. с польск./Под ред. Г. С. Кучинского. Л.: Энергия, 1972.

22. Балыгин И. Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.: Энергия, 1964.

23. Шахнович М. И. Синтетические жидкости для электрических аппаратов. М.: Энергия, 1972

24. Крейн **И. Р.,** Кулакова **Р. В.** Нефтяные изоляционные масла. М.: Госэнергоиздат, 1959.

25. Лишгейн Р. А., Шахнович М. И. Трансформаторное масло. — 2-е изд. М.: Энергия, 1968.

26. Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. — 3-е изд. Л.: Энергия, 1969.

27. Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия, 1972. Т 1 (А—К); 1974. Т. 2. (Л — Полинозные волокна); 1977. Т. 3 (Полиоксадиазолы — Я).

28. **Поливинилхлоридные** пластикаты и их применение в кабельной технике/Ю. И. Ван-Гаут, Ю. М. Котт, Ю. В. Ляхов, И. Д. Троицкий/Под ред. И. Д. Троицкого. М.: Энергия, 1978.

29. Барановский В. В., Дулицкая Г. М. Слоистые пластики электротехнического назначения. М.: Энергия, **1976.**

30. Гладков А. 3. Электроизоляционные лаки и компаунды. М.: Энергия, 1973.

31. Вариконды в электронных импульсных схемах/ В. Ю. Булыбенко, Т. И. Вербицкая, В. Ф. Анципарович и др./Под ред. В. Ю. Булыбенко. М.: Советское радио, 1971.

32. Пасынков **В. В.** Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1980.

33. Смажевская Е. **Г.,** Фельдман Н. **Б.** Пьезоэлектрическая керамика. М Советское радио, 1971

34. Глозман **И. А.** Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972.

Глава 24

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Н.** Л. **Бабушкина

Термоэлектрические явления — группа физических явлений (Зеебека, Пельтье и Томсона), обусловленных существованием взаимосвязи между тепловыми и электрическими процессами в проводниках.

Эффект Зеебека состоит в том, что в электрической цепи из разнородных металлов возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС) Еп, если места контактов поддерживаются при разных температурах Ti и Гг.

Термо-ЭДС £12 зависит только от температур Ti и Гг соединенных проводников и от природы материалов, составляющих термоэлемент. По значению £12 оценивают температуру в месте спая. В небольшом интервале температур имеет место зависимость £'i2=Si2(7"i—*T2),* где 5,2 — коэффициент термо-ЭДС, определяемый природой материалов термоэлемента и интервалом температур, в котором он применяется. Коэффициент S12 может резко меняться с температурой (и даже менять знак).

Измеряемые термо-ЭДС относятся всегда к паре металлов и поэтому не являются характеристиками отдельных металлов. В таблицах обычно приводят термо-ЭДС материалов по отношению к свинцу, платине или меди

Эффект Пельтье состоит в том, что при прохождении тока через спай различных проводников кроме джоулева тепла выделяется или поглощается в зависимости от направления тока некоторое количество тепла (?п, пропорциональное протекающему через контакт заряду (т. е силе тока / и времени *t),*

$$Qr^{\wedge\wedge}nit,$$

где П — коэффициент Пельтье, который зависит от природы находящихся в контакте материалов (см. табл. 24.6)

Эффект Пельтье так же, как эффект Зеебека, можно наблюдать лишь при наличии двух разнородных проводников.

Эффект Томсона заключается в обратимом выделении (или поглощении) теплоты в однородном проводнике, по которому протекает электрический ток, при одновременном наличии параллельного току градиента температуры:

где (Х — коэффициент Томсона, зависящий от природы материала (см. табл. 24.7); / — ток; i—время.

В противоположность явлениям Зеебека и Пельтье эффект Томсона относится к одному однородному проводнику, поэтому Коэффщиент р, для любого проводника может быть определен независимо.

Согласно термодинамической теории коэффициенты Томсона *Д,* Зеебека S и Пельтье *П* связаны соотношениями Кельвина:

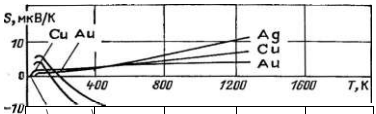
По известной зависимости коэффициента Томсона от те.мпературы можно рассчитать коэффициенты термо-ЭДС и Пельтье отдельных металлов — так называемые абсолютные коэффициенты термо-ЭДС и Пельтье метал-

Дифференциальная термо-ЭДС пары металлов представляется в виде разности абсолютных значений термо-ЭДС отдельных металлов:

Абсолютная термо-ЭДС металла при низкой температуре может быть измерена, если составить термопару из металла и сверхпроводника, так как дифференциальная термо-ЭДС в этом случае создается только ее нормальной ветвью.

Абсолютная термо-ЭДС свиица (табл. 24.1), полученная таким образом Кристиан [1], является общепризнанным стандартом, используемым для всех термоэлектрических измерений Значения абсолютной термо-ЭДС свинца, приведенные в более поздней работе Робертса [2 отся от данных Кристиан при температуре выше 20 К (табл. 24.1).

При высоких температурах «стандартами» могут также служить благородные металлы: медь, серебро, зо-



A q			P t	
			P d	

a)

5, мкВ/К *f)* S'JMKB/K

3.0

2,5

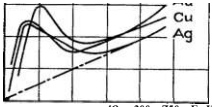


Рис. 24.1. Абсолютная термо-ЭДС металлов:
а — тугоплавких и благородных в области температур і 300 к [5]; б — меди, серебра и золота при температурах до 250 К f71; *в* — щелочных металлов при низких т(ратурах 17|

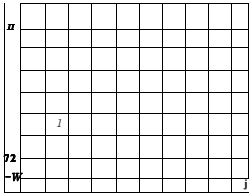


Рис. 24.2. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС щелочных металлов:
t — обобщенная кривая рубидия; 2 — дли

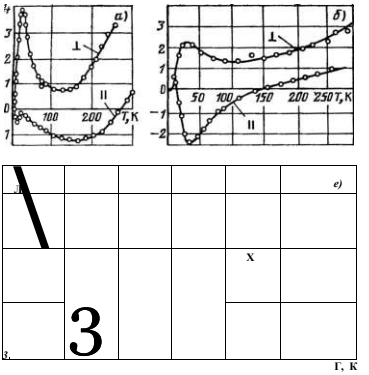


Рис. 24.3. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС кадмия (а), цинка (б) и магния (в) в параллельном (И) и перпендикулярном (1.) гексагональным осям направлениях [9]

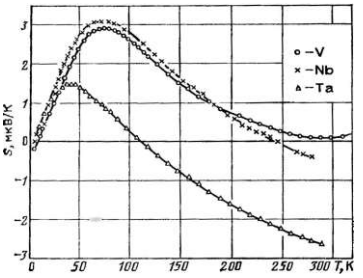


Рис. 24.4. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС ванадии, ниобия и тантала [10]

лото (табл. 24.2). Их следует предпочесть переходным металлам — платине или вольфраму, значения абсолютных термо-ЭДС которых значительно больше.

В табл. 24.3 и 24.4 представлены значения термо-ЭДС переходных металлов. В табл. 24.5 приведены дифференциальные термо-ЭДС металлов относительно платины. На рис. 24.1—24.12 приведены температурные зависимости абсолютных термо-ЭДС для ряда металлов.

Цифры, приводимые в таблицах, следует считать не абсолютно точными, а лишь наиболее заслуживающими доверия, так как термо-ЭДС материала чувствительна к ничтожному количеству примесей, к ориентации кри-

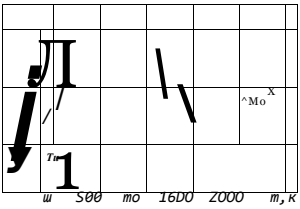


Рис. 24.5. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС вольфрама, молибдена и хрома [8]; 7"w—точка Нееля для хрома

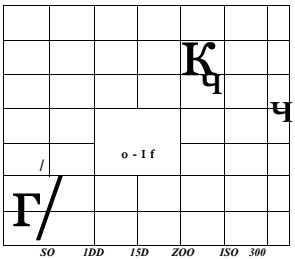


Рис. 24.6. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС родия и иридия [10]

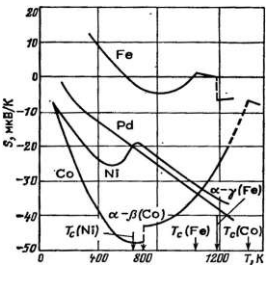


Рис. 24.7. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС никеля, железа, палладия и кобальта [11]:
— точка Кюри; а—Р, а—V — точки структурных переходов кобальта

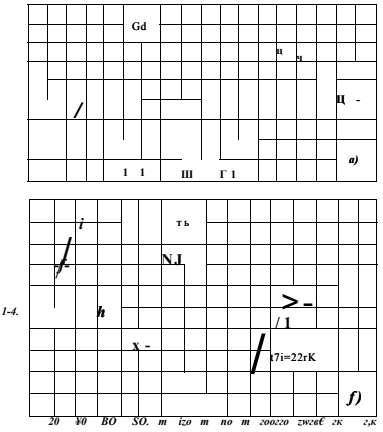


Рис. 24.8. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС монокристаллов:

а • гадолиния [121 (О — в базисной плоскости, Л — по оси *с.* но оси с при в=0,1 Тл, П - в плоскости а—с, 17° от б —тербия [12] (О — по оси *а,* • — по оси *Ь,* ^ — по оси *с. ш* - по оси *Ь* при В=0,13 Тл)

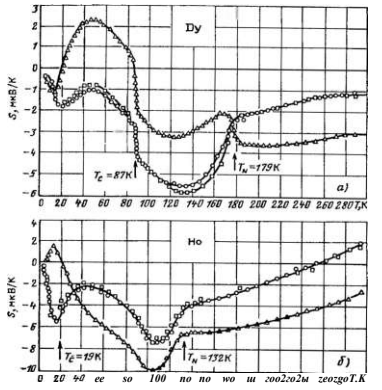


Рис 24.9. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС монокристаллов диспрозия *(а)* и гольмия (б) [12]:

О — по оси о; • — по оси Ь; Л — по оси *с*

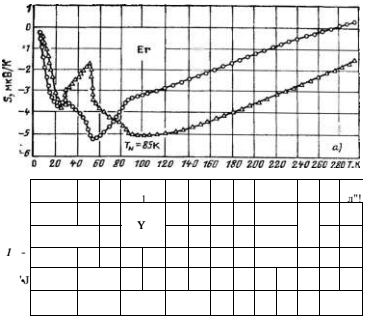


Рис. 24.10. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС монокристаллов эрбия *(а)* и иттрия (б) [12]:

О — в базисной плоскости; Л — по оси *с*

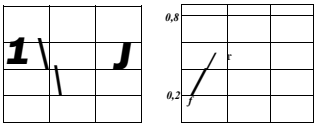


Рис. 24.11. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС маигаиина [13] (Си — 82,270, Мп — 13,3%, Ni— 4,5%)

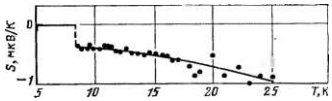


Рис. 24.12. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС сверхпроводящего сплава Nb — 4870, Ti — 52% (T_nр = 9 К) [14]

сталлических зерен, термической или даже холодной обработке материала По этой причине термо-ЭДС может возникнуть (при наличии температурных перепадов) в цепи, состоящей из одного и того же материала, если различные участки цепи подвергались различной технологической обработке. При сравнении значении S материалов, измеренных разными исследователями, могут выявляться расхождения порядка 1070.

Градуировочные таблицы термопар см. в гл. 8.

Наиболее полные теоретические и экспериментальные данные по термоэлектрическим явлениям представлены в[3].

Обобщенные данные о составе, физико-химических и метрологических свойствах применяемых в настоящее время сплавов для термопар см. в [4].

Таблица 24.1. Абсолютная термо-ЭДС чистого свинца по данным Кристиан [1] и Робертса |2)

m, к	мкВ/К	мкВ/К	*m*, к	^КР' мкВ/К	^роб. мкВ/К
7,25	-0,204	-0,204	40,0	-0,764	-0,575
7,5	-0,221	-0,220	42,0	-0,766	—0,564
8,0	-0,257	-0,226	44,0	-0,768	-0,555
8,5	-0,297	-0,298	46,0	-0,770	-0,548
9,0	-0,343	-0,343	48,0	-0,772	-0,542
9,5	-0,390	-0,388	50,0	—0,774	—0,537
10,0	-0,434	-0,433	55,0	-0,777	-0,530
10,5	-0,475	-0,476	60,0	-0,779	-0,527
11,0	-0,516	-0,517	65,0	**-0,782**	-0,528
11,5	-0,556	-0,556	70,0	**-0,784**	-0,531
12,0	-0,593	-0,593	80,0	—0,794	-0,544
12,5	—0,628	—0,627	90,0	-0,824	-0,562
13,0	-0,658	-0,657	100,0	—0,865	—0,583
13,5	-0,683	-0,684	110,0	0 899	-0,606
14,0	-0,706	-0,707	120,0	-0^927	-0,631
14,5	-0,728	-0,728	130,0	-0,952	-0,656
15,0	-0,746	-0,745	140,0	—0,980	—0,682
15,5	-0,760	-0,759	150,0	-1,010	-0,708
16,0	-0,771	—0,770	160,0	-1,034	-0,734
16,5	-0,777	-0,777	170,0	-1,054	—0,760
17,0	-0,781	-0,782	180,0	-1,075	-0,785
18,0	-0,785	-0,786	190,0	—1,098	-0,810
19,0	-0,785	-0,784	200,0	-1,120	-0,834
20,0	-0,784	-0,779	210,0	-1,143	-0,858
21,0	-0,783	-0,771	220,0	-1,161	-0,882
22,0	—0,782	—0,760	230,0	-1,175	-0,904
23,0	-0,781	-0,748	240,0	—1,191	—0,927
24,0	-0,780	-0,735	250,0	-1,205	-0,948
25,0	-0,779	-0,721	260,0	—1,224	-0,969
26,0	-0,778	-0,707	270,0	-1,243	0 989
27,0	-0,777	-0,694	280,0	—1,259	—1,009
28,0	-0,776	-0,681	290,0	-1,271	-1,028
29,0	-0,775	—0,669	300,0	–	-1,047
30,0	-0,774	-0,657	310,0	–	—1,065
32,0	-0,772	-0.636	320,0		-1,084
34,0	-0,770	-0,617	330,0		—1,101
36,0	-0,768	-0,601	340,0		-1,119
38,0	-0,766	-0,587	350,0		-1,136

Таблица 24.2. Абсолютная термо-ЭДС для некоторых металлов [51 в интервале температур от 100 до 2400 К. значения основаны на данных РЬ [1]

T. к	S. мкВ/К						
	Си	Ag	Au	Pt	Pd	w	Mo
100	1,19	0,73	0,82	4,29	2,00	—	—
150	1,12	0,85	1,02	1,32	-1,63	–	–
200	1,29	1,05	1,34	-1,27	—4,85	–	–
273	1,70	1,33	1,79	-4,45	-9,00	-	-
300	1,83	1,51	1,94	-5,28	-9,99	1,07	5,57
400	2,34	2,08	2,46	-7,83	-13,00	4,44	8,52
500	2,83	2,82	2,86	-9,89	-16,03	7,53	11,12
600	3,33	3,72	3,18	-11,66	-19,06	10,29	13,27
700	3,8а	4,72	3,43	-13,31	-22,09	12,66	14,94
800	4,34	5,77	3,63	—14,88	—25,12	14,65	16,13
900	4,85	6,85	3,77	-16,39	—28,15	16,28	16,86
1000	5,36	7,95	3,85	-17,86	-31,18	17,57	17,16
1100	5,88	9,06	3,88	-19,29	-34,21	18,53	17,08
1200	6,40	10,15	3,86	-20,69	—37,24	19,18	16,65
1300	6,91	–	3,78	-22,06	-40,27	19,53	15,92
1400	–	–	–	-23,41	—43,30	19,60	14,94
1600	–	–	–	-26,06	—49,36	18,97	12,42
1800	-	-	–	—28,66	-55,42	17,41	9,52
2000	–	–	–	-31,23	-61,48	15,05	6,67
2200	–	–	–	–	–	12,01	4.30
2400						8,39	2,87

Таблица 24.3. Значения S для чистых переходных металлов при температуре ниже комнатной, мкВ/К [3] (основаны на данных для РЬ [1])

Элемент	Термо-ЭДС при температуре, К								
	10	20	50	80	100	150	200	250	273
					Группа IIIB				
	-1,6	-3,0	-8,0	-12,7	-14,0	-15,6	-16,3	-16,5	-16,2
	-0,3	-0,4	-3,3	—4,5	—4,4	—3,1	-1.9	-0,9	-0.7
	—0,5	-0,4	-2,8		-4,9	-4,5	-3.2	-1,4	-0,5
					+ 0,3	+0,4	+0,7	**+ 1,0**	+ 1,3
					Группа IVB				
			-3,0	-3,0	-2,6	O	**+2,0**	+4,0	+4.5
			O	+3,0	+4,5	+7.5	+8,5	+9,5	+9,5
						+2.5	+3,7	+4,7	+5,3

Элемент	Термо-ЭДС при температуре, К								
	10	20	50	80	100	J50	200	250	273
					Группа VB				
	+0,19	+0,76	+2,45	+2,91	+2,65	+ 1,52	+0,72	**+0,26**	+0,13
	+0,31	+0,98	+2,73	+3,09	+3,13	+ 1,42	+0,65	-0,04	**-0,20**
	+0,36	+ 1,03	+ 1,41	**+0,78**	O	**-0,8**	—1,5	**-2,0**	**-2,2**
					Группа VIB				
Cr*з	+3,1	+6,7	**+8,2**	+5,0	+5,0	+7,0	**+ 11**,8	+ 17,5	+18,8
Mo*з	—0,02	**-0,11**	-0,48	**—0,2**	**+0,1**	+0,94	+2,50	+4,08	+4,57
W*3	+0,05	—0,28	-2,78	—3,70	—4,04	—2,45	—1,41	**-0,10**	+0,56
					Группа VIIB				
Мп		+ 12,5	+ 15,5	+6	-2,5	-7,0		-9,7	**-10,0**
Tc									
Re	+0,61	+1,32	+1,1	**+0,08**	**-0,66**	—2,21	-3,51	4,63	-5,03
					Группа VIII				
Pe*4	+1,0	+2,5	+8,0	+12,0	+13,0	+ 16,0	+ 17,0	+15,5	+15,0
Ru			—	+0,2	0	-1,1	-1,5	-1,5	-1,5
Os				-2,2	-3,2	—3,8	-4,0	-4,0	-4,0
Co*«		—0,5	—1,0	-3,0	—4,0	-9,0	-12,0	—18,0	-19,0
Rh*8	—0,19	-0,33	—0,11	+0,54	+0,78	+0,92	+0,75	+0,58	+0,48
Ir*6		—0,11	+0,13	+0,57	+0,73	+0,77	+0,64	+0,46	+0,35
	—2,0	—4,7	—7,2	-8,1	-11,0	—11,0	**—13,5**	—17,0	-18,0
	+0,4	+ 1,6	+4,3	+3,7	+2,00	—1,63	**-4,85**	—7,42	-9,00
Pt	+0,6	+2,3	+5,8	+5,5	+4,29	+1,82	—1,27	—3,28	-4,45

знаменателе — вдоль оси

рис. 24.4
а л. также рис. 24.5
См. также рис. 24.7 [IC
' См. также рис. 24.6

Таблица 24.4. **Области линейной зависимости термо-ЭДС переходных металлов**

Группа IIIB	
150—500	-7,2-н-5
750-1400	
300-583	—2-i-2,3
Группа IVB	
400-800	3н—5
400—800	7,5н~5
900-1400	
500-1000	8-0
Группа VB	
500-1100	1—6
600-1400	—1,5н-6
1100-1800	-2-4-9
Группа VIB	
500-800	10-12
300—600	6-13
1200—2100	1,6—7
200-300	—2-г-2,Е
1800—2400	17-8

Группа VIIB	
300—1000	—10Ч-—4
450—1500	
Группа VIIIB	
300—700	12^-5
500—1800	—2-.—9,5
600-1800	-3,8^-10
100-500	-5^-46
1400—1600	—8-4—8,5
600—1700	0,5^—0,8
300-1300	1^—0,4
1400—1800	-4,5-4—9
200—500	—15^—2,5
600-1500	—20-4-40
300-1800	-10^-30
400-2000	-8-55

Таблица 24.5. Значения термо-ЭДС материалов (мВ) относительно платины для различных температур в градусах шкалы МПТШ-68 [6]

Температура свободных концов термопары 273 К. Положительный знак термо-ЭДС металла соответствует току через спай термопары, идущему от платины к этому металлу.

Материал	Температура, К									
	73	173	373	473	673	873	1073	1273	1473	1673
Элементы										
Алюминий	0,45	0,06	0,42	1,06	2,84	5,15	—	—	—	—
Висмут	-0,04	—0,31	0,90	2,35	—	—	—	—	—	—
Вольфрам	0,43	-0,15	1,12	2,62	6,70	12,26	19,25	27,73	37,72	—
Гереций	-44,00	—26,62	33,9	72,4	82,3	43,9	—	—	—	—
Золото	—0,21	-0,39	0,78	1,84	4,63	8,12	12,26	17,05	—	—
Индий			0,69			—	—	—	—	—
Иридий	-0,25	—0,35	0,65	1,49	3,55	6,10	9,10	12,57	16,45	20,47
Кадмий	-0,04	-0,31	0,90	2,35	—	—	—	—	—	—
Калий	1,61	0,78								
Кальций	—	—	**-0,51**	—1,13	—	—	—	—	—	—
Кобальт			-1,33	-3,08	-7,24	— 11,28	-13,99	-14,21	—	—
Кремний	63,13	37,17	-41,56	-80,57	—	—	—	—	—	—
Литий	-1,12	-1,00	1,82	—	—	—	—	—	—	—
Магний	0,37	-0,09	0,44	1,10	—	—	—	—	—	—
Медь	-0,19	-0,37	0,76	1,83	4,68	8,34	12,81	18,16	—	—
Молибден			1,45	3,19	7,57	13,13	19,83	27,74	36,96	—
Натрий	1,00	-0729				—	—	—	—	—
Никкь	2,28	1,12	—1,48	—3,10	-5,45	—7,04	-9,83	-12,11	—	—
Олово	0,26	—0,12	0,42	1,07	—	—	—	—	—	—
Палладий	0,81	0,48	-0,57	-1,23	-2,82	-5,03	-7,96	-11,61	-15,86	-20,40
Родий	-0,20	-0,34	0,70	1,61	3,91	6,77	10,14	14,02	18,39	22,99
Рубидий	1,09	0,46								
Ртуть	—	—	-0,60	-1,33	—	—	—	—	—	—
Свинец	0,24	-0,13	0,44	1,09						
Серебро	-0,21	-0,39	0,74	1,77	4,57	8,41	**13.33**	—	—	—
Сурьш			4,89	10,14^	20,53	28,87	—	—	—	—
Таллий			0,58	1,30	—	—	—	—	—	—
Тантал	0,21	-0,10	0,33	0,93	2,91	5,95	10,02	15,15	21,37	—
Торий			-0,13	-0,26	—0,50	—0,45	0,22	1,72	4,03	—
Углерод	—	—	0,70	1,54	3,72	6,79	10,98	16,46	—	—
Церий	0,22	—0,13								
Цинк	—0,07	-0,33	0,76	1,89	**5,29**					
Материалы для термопар										
Алюмель	-2,39	1,29	-1,29	-2,17	-3,64	-5,28	-7,07	—8,78	—10,33	-11,72
(94% Ni+2% AI+ + 2%Si + 2%Mn)										
Хромель	-3,36	—2,20	2.81	5,96	12,75	19,61	26,20	32,47	38,48	44,04
(90% Ni + 10% Cr)										
Константан (60%Cu+40%Nj)	5 35	2,98	-3,51	-7,45	-16,19	-25,46	-34,81	—43,85		—
Сплавы										
Манганин	—	—	0,61	**1,55**	4,25	7,84	—	—	—	—
(84% Cu+4% Ni-h + 12% Mn)										
Нихром (80% Ni+ + 20%Cr)	—	—	1,14	2,62	6,25	10,53	15,41	20,87	-	-
Ферроникром (60%Ni+24%Fe-f + 16% Cr)	—	—	0,85	2,01	5,00	8,68	13,03	18,06	—	-
Бронза бериллиевая (98% Cu+2% Be)	—	—	0,67	**1,26**	**4,19**					
Бронза фосфористая (**85% Cu -1-13% Sn-M,86% Zn-f** + 0,16% Pb-1- +0,013% P)		—	0,55	1,34	3,50	6,30	—	—	—	

Таблица 24.6. Значения коэффициента Пельтье для различных пар металлов [15]

Железо - константан		Медь — никель		Свинец — константан	
Т, К	*П.* ыВ	*Т.* К	я, мв	Г, К	Я, мВ
273	13	292	8,0	293	8,7
293	15	328	9,0	383	11,8
403	19	478	10,3	508	16,0
513	26	563	8,6	578	18,7
593	34	613	8,0	633	20,6
833	52	718	10,0	713	23,4

П1 [мечание. Медь — константан: Я = 11,0мВ при *Т* = 293 К.

Таблица 24.7. Значения коэффициента Томсона для различных металлов [15]

Металл		*т.* к	1), ыкВ/К
Ag		105 150 300	-0,10 +0,55 + 1,31
А] (99 %)		260 300 400	+0,11 -0,08 −0,56
Аи		105 150 300	+0,29 +0,96 + 1,61
Cd (монокристалл)	II*	373 473	+ 6,9 +7,3
	X 2*	373 473	+8,2 +8,7
Со		100 200 300	-8,4 — 19,6 -25,4
Си		70 170 300	-0,26 +0,47 + 1,52
Си + 0.37% Аи		20 40 60 90 130 300	+0,44 +2,17 +2,96 +2,20 + 1,71 +2,33
Fe (армко)		323 423 523	-15,3 -22,8 -26,3

Продолжение табл. 26.1 Продолжение табл. 26.1

Металл		Г. *к*	р., мкВ/К
Ni		100 200 260	-4,5 -12,1 -15,7
Pb (99,99%)		120 200 400	-0,19 -0,45 -0,85
Pd		20 100 200 300	+1,9 -7,8 -12,1 -18,2
Pt		203 273 393	-9,6 —9,1 -9,2
Sn (99,99%)		100 200 300 400	+0,86 +0,42 -0,07 -0,45
Zn (монокристалл)	II *	322,5 398	+1,6 +4,6
		322,5 398	+4,1 +8,8
W		»	+8,5
Константан		323 384 446	—24,6 -25,5 -26,0
Нейзильбер		328	-12,0

I) — образец вырезан вдоль гексагональной оси кристг (томсон-эффект измеряется вдоль образца).
X — образец вырезан под углом 90° к гексагональной кристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chistian J. W., Jan J.-P., Preason W. B., Templeton I. M.//PROC. Roy. Soc. Lond. 1958. Vol. A245. P. 213—221.

2. Roberts R. B.//Phil. Mag. 1977. Vol. 36, № i. P. 91—107.

3. Блатт Ф. Д. Термоэлектродвижущая сила металлов: Пер. с англ./Под ред. Д. К. Белащенко. М.: Металлургия, 1980.

4. Рогельберг И. Л., Бейлин В. М. Сплавы для термопар: Справочник. М.: Металлургия,

5. Cusack N.. Kendall P.//Proc. Phys. Soc. 8. Vol. 72. P. 898-893.

6. Physics Vade Mecum AIP 50th Anniversary/Ed. Herbert L. Anderson N. Y., AIP, 1981.

7. Mac Donald D. K. C. Thermoelectricity: An Introduction to the Principles. N. Y.: John Wiley and Sons, 1962.

8. Vedernikov M. N., Burkov A. T. Present state of experimental knowledge on thermopower of metals at high temperatures adove 77 K.: Thermoelectricity in Metallic Conductors/Ed. F. J. Blatt. N. Y. Lond.: Plenum Press, 1978.

9. Rowe V. A., Schroeder P. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. P. 1—8.

10. Carter R., Davidson A., Schroeder P. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31, № 10. P. 2374—2376.

11. Greig D. Thermoelectricity in transition metals.— Thermoelectricity in Metallic Conductors/Ed. F. J. Blatt. N. Y. — Lond., Plenum Press, 1978.

12. Sill L. R., Legvold S.//Phys. Rev. 1965. Vol. 137, №4A. P. 1139—1145.

13. Rathanayaka K. D. D.//J. Phys. E. Sci Instrum. 1985. Vol. 18, № 5. P. 380—382.

14. Harmans C.//Cryogenics. 1982. Vol. 22, N 1. P. 39—40.

15. Landold-Bornstein. Zahlenwerde und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften. Berlin, Gottingen-Heidelberg: Springer-Verlag, 1959.

Глава 25
ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЭМИССИЯ

Т. М. Лифшиц, А. Л. Мусатов

25.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Электронная и ионная эмиссия — испускание электронов или ионов телами под влиянием внешних воздействий: нагревания, потока фотонов, электронов, ионов или сильного электрического поля. В зависимости от характера внешнего воздействия различают соответственно термоэлектронную, термоионную, фотоэлектронную, вторичную электронную и вторичную ионную, электронно-ионную, ионно-электроинную и полевую (впаче — туннельную или автоэлектронную) эмиссии. Во всех видах эмиссии, кроме полевой, роль внешних воздействий состоит в увеличении энергии части электронов или ионов тела до значения, позволяющего преодолеть действие сил, которые связывают их с телом, и выйтп в вакуум или в другую среду. При ионной эмиссии эмитироваться могут как положительные, так и отрицательные ионы.

Тело, испускающее электроны или ионы, называется *эмиттером.* Для наблюдения и использования электронной или ионной эмиссии необходимо создать у поверхности эмиттепя электрическое поле, отсасывающее эмитированные частицы. Обычно для достижения эмиссионным током насыщения достаточно приложить небольшое поле (десятки или сотни вольт на сантиметр). В случае полевой эмиссии внешнее электрическое поле превращает потенциальный порог, существующий на границе тела и препятствующим выходу электронов, в барьер конечной ширины и уменьшает его высоту, вследствие чего становится возможным кваитовомеханическое туннелироиапию электронов сквозь барьер. При этом энергия электрического поля затрачивается только на ускорение эмитированных электронов. Для возникновения полевой

б д м приложить к телу сильное электрическое поле (1 ~ 10' В/см), при этом плотность тока может достигнуть Ю- А/см^. При еще больших импульсных нолях локальные участки эмиттера (выступы, заострения) сильно разогреваются (чаще всего током полевой эмиссии) и взрываются. Часть вещества эмиттера переходит из конденсированной фазы в плотную плазму. Этот процесс сопровождается испусканием интенсивного электронного потока — возникает взрывная электронная эмиссия. Монографии и обзоры по эмиссионной электронике и различным видам эмиттеров приведены в [1—4, 7, 12, 14—17, 27—30, 34].

25.2. РАБОТА ВЫХОДА

Важнейшей эмиссионной характеристикой твердых тел является ***работа выхода*** еф (е — заряд электрона ф —потенциал), равная минимальной энергии, которая необходима для перемещения электрона с поверхностг Ферми в теле в вакуум, в точку пространства, где напряженность электрического поля практически равн; нулю [1]. Если отсчитывать потенциал от уровня, соот ветствующего покоящемуся электрону в вакууме, то ф— потенциал внутри кристалла, отвечающий уровню Ферми. Согласно современным представлениям в поверхностный потенциальный барьер, при преодолении которого i совершается работа выхода, основной вклад вносят об менные и корреляционные эффекты, а также — в мень шей степени — электрический двойной слой у поверхно сти тела. Наиболее распространенные методы экспери ментального определения работы выхода — эмиссионные: по температурной, спектральной или полевой зависимости соответственно термо- фото- или полевой эмиссии, а также по измерению контактной разности потенциалов .между исследуемым телом н другим телом (анодом), работа выхода которого известна [1, 2]. В табл. 25.1, 25.3 и 25.4 приведены значения работы выхода простых веществ и некоторых соединений. Внешнее электрическое поле уменьшает работу выхода (эффект Шотткн). Если поверхность эмнттера однородна, то уменьшение работы выхода, эВ, при наложении электрического поля напряженностью S, В/см, равно

Тонкие слои адсорбированных щелочных и щелочноземельных металлов на поверхности тел существенно снижают работу выхода. Особенно сильно уменьшается работа выхода металлов и полупроводников при адсорбции на их предварительно очищенных поверхностях слоев цезия, бария и их оксидов. Углерод и кислород при адсорбции на поверхности тел, как правило, увеличивают их работу выхода (табл. 25.2, рис. 25.1 и 25.2).

Таблица 25.1. Работа выхода простых веществ (в круглых скобках приведены кристаллографические индексы граней) [2]

Элемент	<Ф эВ	
	Поликристалл [2]	Монокристалл [3]
Алюминии	4,25	4,41 (100) 4,06 1(110) 4,24 (;iii)
Барий	2,49	
Бериллий	3,92	
Бор	4,5	
Ванадий	4,12	
Висмут	4,4	
Вольфрам	4,54	4,63 (100) 5,25 ([110) 4,47 (111) 4,18 ([Н3) 4,30 (116)
Гадолиннии	3,1	
Галлий	3,96	
Гафний	3,53	
Германий	4,76	4,80 (111)
Гольмий	3,22	
Диспрозий	3,25	
Европий	2,5	
Железо	4,31	4,67 (100)
	4,70а	4,81 (111)
	4,62р	
	4,68**у**	
Золото	5,1[3]	**5.47 (•**100) **5.37 1**(ПО) 5,31 (111)
Индий	**3,8**	
Иридий	**5,27[3]**	5,42 (ПО) 5,76 (111) 5,67 (100) 5,00 (210)
Иттрий	3,3	
Кадмий	4,1	
Калий	2,22	2,39 (ПО)
Кальций	2,80	
Кобальт	4,41	
Кремний	4.8	4,85 (100)« 4,91 (100)*" 4,60 (1П)*а
Лантан	3,3	
Литий	2,38	
Лютеций	3,33	
Магний	3,64	
Марганец	3,83	
Медь	4,40	4,59 ([100) 4,48 ([ПО) 4,98 (III) 4,53 (112)
Молибден	4,3	4,53 (100) 4,95 (ПО) 4,55 (П1) 4,36 **112)** 4,50 (114)
Мышьяк	3,75[3]	4,55 (332)
Натрий	2,35	
Неодим	3,2	
Никель	**4,50**	5,22 ([100) 5,04 ([ПО) 5,35 (:И1)

Продолжение табл. 26.1 Продолжение табл. 26.1

Элемент	в ср. 9В	
	Поликристалл [2]	Монокристалл [3]
Ниобий	3,99	**4,02 (001)** **4,87 (ПО)** 4,36 (111) 4,63 (112) 4,29 (113) 3,95 (116) 4.18 (310)
Олово	4,38	–
Осмий	4,7	–
Палладий	4,8	5,6 (111)
Платина	5,32	5,7 (111)
Празеодим	2,7	
Рений	5,0	5,75 (1011)
Родий	4,75	–
Ртуть	4,52	–
Рубидии	2,16	–
Рутений	4,60	–
Самарий	2,7	–
Свинец	4,0	–
Селей	4,72	–
Серебро	4,3	**4,64 (100)**
		t^ill?!
Скандий	3,3	–
Стронций	2,35	–
Сурьма	4,08	4,7 (100)
Таллий	3,7	
Тантал	4,12	4,15 (100) 4,80 (ПО) 4,00 (111)
Теллур	4,73	–
Тербий	3,15	–
Титан	3,95	–
Торий	3,30	–
Тулий	3,10	–
Углерод	4,7	
Уран	3,3	3,73 (100) 3,90 (ПО) 3,67 (113)
Хром	**4,58**	–
Цезий	**1,81**	–
Церий	2,7	
Цинк	4,24	4,9 (0001)
Цирконий	**3,9**	–
Эрбий	**3,25**	

Таблица 25.2. **Работа выхода поликристаллических простых веществ, покрытых оптимальным слоем адсорбата [2]. Вещества расположены по латинскому алфавиту**

Вещество — адсорбат	*e<f.* эВ	Вещество — адсорбат	
Ag-O, cs	1,0-1,2	Au-C	4,05
Ag-Ba	1,56	Au—O	5,66
Ag-Cs	1,65	Be—Cs	1,94
Au-Cs	1,8	1 C-Cs	1,37
Au—Ba	2,3	Ce-Ba	2,2
		Cr—Cs	1,71

Продолжение табл. 26.1 Продолжение табл. 26.1

Вещество—адсорбат	e<f, эВ	Вещество — адсорбат	ef. ЭВ
Cu-Cs	1,64	Pt-O	6,55
Cu-Ba	3,35	Re-Cs	1,4-1,51
Fe-Cs	1,82	Re—к	1,72*
Hf-Ba	2,3-2,4	Re-Y	2,38
Ir-Cs	1,79	Re-Ba	2,42
Ir-Ba	2,4	Re-Th	2,58-3,15
Mo-Cs	1,54-1,66	Rh-Ba	2,1-2,2
Mo-K	1,76	Ru—Ba	2,22
Mo—Ba	2,2	Ta-Cs	1,6-1,69
.Mo-Na	2,64	Ta—Ba	2,2
Nb-Cs	**1,37**	Ta-Th	2,52
Nb-Ba	**2,2**	Ta-Y	3,02
Ni-Cs	1,37	W—Cs	1,62—1,78
Ni-Ba	1,52	W-Ba, o	1,96
Os-Cs	1,44-1,5	W-K	2,0
Os-Ba	2,22	W-Ba	2,1
Pd-Cs	1,51	W-Y	3,0
Pt-Rb	1,57	W—Th	3,0-3,3
Pt-Cs	1,59	W—ciU	3,37
Й-K	1,69	w—pu	3,31
Pt-Ba	2,05	w—YU	3,19
Pt-Na	2,10		

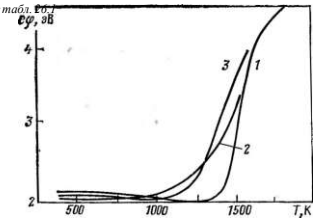


Рис. 25.2 Изменение работы выхода поверхностей (10(вольфрама *(i),* (100) иридия (2) и сплава осмий — ирдий *(3),* покрытых пленкой оксида бария толщиной {0,{ монослоя, при нагревании [5]

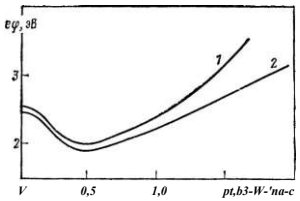


Рис. **25.1.** Изменение работы выхода моноатомного слоя бария на поверхностях (100) вольфрама *(1)* и иридия *(2)* в процессе окисления. По оси абсцисс отложена экспозиция поверхности в кислороде **[5]**

Таблица 25. 3. **Работа выхода некоторых монокристаллических полупроводников [2] (в скобках для работы выхода указаны погрешности)**

полупровод-	Индекс грани	e<e, 9В	Примечания
AgAsSa	(100)	**5.7**	Сколотая грань
AlSb	(110)	**4.86**	**р-Тип, сколотая граи**
ВцТеэ	(0001)	5,40	
GaAs	(100)	**4,38 (0,05)**	р-Тип
	(110)	**4,05-4,45**	П-Тип
	(ПО)	4,65-5,35	р-Тип
	(111)	5,13	П-Тип
GaSb	(100)	4,0	р-Тип
	(ПО)	4,55	р-Тнп
	(110)	4,01 (0,02)	п-Тип
InAs	(ПО)	4,9 (0,05)	Сколотая грань
InSb	{1?1	4,57-4,77	
		4,39-4,43	
PbS	(100)	3,5 (0,2)	Сколотая грань
PbSe	(001)	4,14-4,30	п-и р-Типы
PbTe	(100)	5,14 (0,2)	п-и р-Типы
V^Oa	(010)	4,5 (0,2)	
	(010)	6,71 (0,08)	

Таблица **25. 4 Работа выхода тугоплавких соединений переходных металлов с неметаллами [4]**

	e<e, эВ, для соединений								
Ванадий	4,12	VE	3,88	VC	3,85	VN	3,56		
	4,54	WE	**2,62**	W2C	2,6-4,58			WSia	4,04-4,62
	3,53	Hfl	3,85	HfC	2,04—4,15	HfN	3,85—3,		
Железо	4,31	FeBj	3,5-3,75						
Иттрий	3.3	YF	2,22-3,58					YSij	3,26
Лантан	3.3	LaE	2,41—3,20						
Марганец	3,83	Mnl	4,14						
Молибден	4.3	MoB2	3,83-4,14	Mo2C	3,80-4,74			MoSia	4,02-4,73
Ниобий	3,99	NbBa	3,65	NbC	2,24—4,1	NbN	3,92	NbSia	4,34
Ренний	5,0							ReSia	4,02
Скандий	3.3	ScB,	2,29-3,76						
Тантал	4,2	TaB^	2,8-4,4	TaC	3,05-4,4	TaN	3,8-4,42	TaSt2	4,42—4,71
Титан	3,95	TiBa	3,80-3,95	TiC	2,35—4,12	TiN	2,92-3,75	TiSia	3,95
Хром	4,58	CrBa	3,36					CrSla	3,78
Цирконий	3,9	ZrB^	3,60-4,48	ZrC	2,1-4	ZrN	2,92-3,90	ZrSia	3,95

25.3. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Плотность тока насыщения термоэлектронной эмиссии (ТЭ) для эмиттера с однородной поверхностью при слабом внешнем электрическом поле, не влияющем на работу выхода, определяется уравнением Ричардсона — Дэшмана [2]:

$$/э = (1 - ї^) Л Т^ бхр (- е <рг / kT),$$

оксиды получаются при разложении карбонатов щелочноземельных металлов, нанесенных на металлический керн катода, в процессе его прогрева непосредственно в вакуумном приборе, в котором катод должен работать. Оксидные низкотемпературные катоды наиболее широко применяются в электровакуумных приборах. В высокотемпературных оксидных катодах с рабочей температурой 1400—1900 К используются оксиды иттрия и тория. Такие катоды применяются в магнетронах.

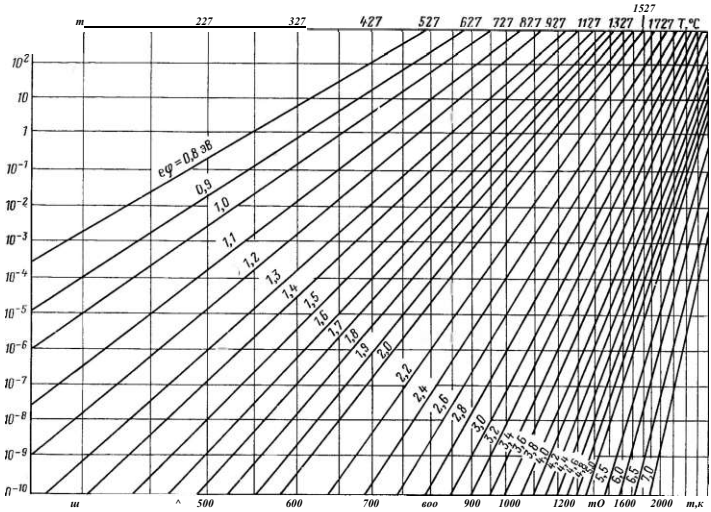


Рис. 25.3. Зависимости плотности тока ТЭ от температуры и работы выхода катода [6]

где л — коэффициент отражения электронов от потенциального барьера, усредненный по энергиям электронов; Ло=4 120,4 А-см-^-К"^ — универсальная постоянная, одинаковая для всех твердых тел; (рг = <Ро-ь + *{d(p/dT)T;* фо —значение (р. В, при *Т=0;* е=1,60Х Х10-1S Кл — заряд электрона: fe=1,38-10-23 Дж-К"' — постоянная Больцмана (рис. 25.3).

Термоэмиссионный катод (термокатод)—элемент электровакуумного или газонаполненного прибора, являющийся источником электронов. Основные типы термоэмиссионных катодов: металлические, оксидные, металлопористые (распределительные), металлосплавные и боридные.

Металлические термокатоды, наготавливаемые из торированного вольфрама, в настоящее время находят ограниченное применение.

Оксидный термокатод — смесь оксидов металлов, нанесенная на металлический керн. В низкотемпературных катодах, работающих в интервале температур от 900 до 1300 К, используются смеси оксидов щелочноземельных металлов — бария, кальция и стронция. Эти

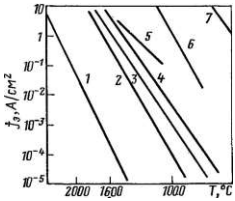


Рис. 25.4. Зависимость плотности тока ТЭ от температуры для различных катодов [7]:

7 — вольфрам; 2 — торированный вольфрам; 3 — оксид тория; ^ — гексаборид лантана (см. также [8]); 5 —оксидно-иттриевый катод с присадками вольфрама, молибдена или тантала [11]; 6 — 1.-катод; 7 — оксидный катод

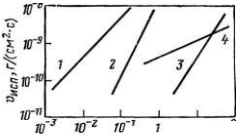


Рис. 25.5. Зависимость скорости испарения от плотности тока ТЭ для различных материалов [7]:
/-вольфрам; 2 — торированный вольфрам; 3 — пропитанный катод; 4 — гексаборид лантана [7, 8]

Металлопористый вольфрамово-бариевый термокатод — пористая вольфрамовая губка, внешняя поверхность которой покрыта пленкой бария, снижающей работу выхода и обеспечивающей получение большого тока ТЭ. **В** процессе работы пленка бария разрушается вследствие ионной бомбардировки и под воздействием газов, ыделяющихся из деталей приборов. Возобновление пленки происходит вследствие поступления бария из вольфрамовой губки при термическом разложении содержащегося Б ней активного вещества. Существует несколько типов металлопористых термокатодов: камерные, или L-катоды — состоят из камеры, заполненной активным веществом — карбонатом бария-стронция — и закрытой стенкой-губкой, наружная сторона которой является эмиттирующей поверхностью; пропитанные — пористая губка из вольфрама, рения или молибдена, поры которой заполнены активным веществом — алюминатом или вольфраматом бария-кальция; и прессованные. Последние изготовляются в виде таблеток или керамических трубок, путем спрессовывания смеси из порошков оксида иттрия или оксида тория и порошков тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, тантал). Катоды этого типа так же, как и оксидно-ториевый, работают при температурах 1700—1800° С и предназначены для использования в СВЧ-приборах, главным образом в магнетронах.

Боридный термокатод — катод на основе металлеподобных соединений типа МеВе, где Ме — щелочноземельный, редкоземельный металлы или торий. В качестве термокатода наиболее широко применяется гексаборид лантана, реже — гексабориды иттрия и гадолиния и диборид хрома. Покрытие оксидного слоя тонкой пленкой осмия понижает работу выхода катода и увеличивает его эмиссионную способность. Термоэмиссионные катоды из гексаборида лантана работают при температуре 1650 К и обеспечивают получение плотности тока ТЭ до 50 А/см^. Высокая механическая прочность и устойчивость таких катодов к ионной бомбардировке позволяет использовать их в режиме термополевой эмиссии (при напряженности внеш'него электрического поля 10⑧ В/см значительная часть эмиссионного тока обусловлена туннелированием электронов сквозь барьер). В этом режиме катод из гексаборида лантана при температуре 1400—1500 К может эмитировать ток с плотностью до 1000 А/см^. Катоды из гексаборида лантана не отравляются на воздухе и устойчиво работают в относительно плохом вакууме. Срок их службы не зависит от давления остаточных газов в приборе до давлений порядка 10"^ Па. Эти катоды используются в ускорителях и различных вакуумных устройствах.

Основные характеристики термокатодов — работа выхода etp; рабочая температура 7"; плотность тока насыщения ТЭ /э и ее зависимость от температуры; скорость испарения активного вещества при рабочей температуре иисп; эффективность катода т) — отношение плотности тока ТЭ к мощности, затрачиваемой на нагревание катода; критерий качества катода q — отношение работы выхода к теплоте испарения активного вещества при данной температуре; толщина активного слоя d (для однородных катодов — диаметр). Характеристики различных термокатодов приведены в табл. 25.5—25.14 и на рис. 25,4—25.11.

Таблица 25.5 Термоэмиссионные свойства вольфрамового термокатода [6] (чистый вольфрам, Р = 19,3 г/см3, e<f = 4,54 эВ)

т. к	/э, А/см^			мм/ч*	Срок службы. ч		
					d = 0,1 мм	d = 1 мм	массивный катод
2100	3,9-10-3	1,6-10-12	2,5-10»	3,0-10-»	1-106	М О'	МО--
2200	1,3-10-2	1,2-10-11	1,1-10»	2,3-10-8	1,4-1106	1,4- 106	1,4. 10'
2300	4,1-10-2	7,8-10-11	5,0-108	1,5-10-'	*2-ю**	2-106	2,2- 106
2400	1,2-10-1	4,4-10-10	2,7-108	8,2-10-'	3-108	3-10*	3-105
2500	3,0-10-1	2,0-10-е	1,5-108	3,7-10-6	830	830G	8-10^
2600	7,0-10-1	8,8-10-в	8,0-10'	1,6-10-5	180	1800	1,8.10«
2700	1,6	3,2-10-8	5,0-10'	6,0-10-Б	50	500	б-Ю''
2800	3,5	1,1-10-'	3,1-10'	2,1-10-*	14	140	1440
2900	7,3	3,5-10-'	2 , Ы о '	6,5-10-«	4,6	46	460
3000	14.0	9,7-10'	1,7.10'	1,8-10-3	1.7	17	170

• **Толщина слоя вещества, испаряющегося** при температуре Т.

Рис. 25.8. Термоэлектронная эмиссия пяти тугоплавких металлов и сплава вольфрам — молибден (в равных массовых количествах) в парах цезия [9]:
температура жидкой фазы цезия 200°С. Наклонные прямые — линии постоянной работы выхода

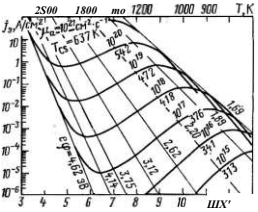


Рис. 26.6. Термоэлектронная эмиссия поликристаллического вольфрама в парах цезия [9]:
для каждой кривой снизу указана температура жидкой фазы цезия Тся и сверху плотность потока атомов цезия на поверхность катода Цс Наклонные прямые — линии постоянной работы выхода

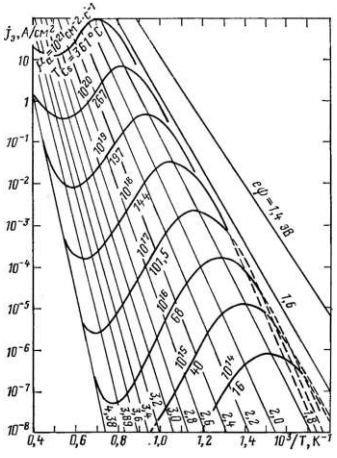


Рис. 25.7. Термоэлектроннаая эмиссия поликристаллического молибдена в парах цезия [9]. Обозначения те же, что на рис. 25.6.

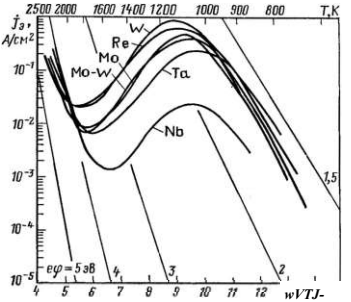


Таблица 25.6. Термоэмиссионные свойства металлопористого вольфрамово-бариевого термокатода (/.-катод) [61 (е<р= Т,8ч-2,о эВ, количество BaO 30 мг/см2)

Г. к	/э,А/см=	Г/(СМ°С)	/э/^исп, Кл/г		срок служ-бы*, ч
800	МО-Б				
900	3-10-^				
1000	5-10-3				—
1100	б-Ю-а				
1200	0,4				
1300	2	1,7-10-10	1,2-Ю'о	6-10-^	5-104
1400	10	2-10-е	5-10»	7-10-«	4300
1500	30	1,7-10-8	1,8-10S	6-10-а	500
1600	90	МО-'	9-108	0,4	75
1700	300	5,5-10-'	5,5-10»	2	15

Таблица 25 7. Термоэмиссионные свойства BaO-8rO-оксидного термокатода [6]

[р = 5,5 г/см^, е<f=1,6 эВ, толщина активного слоя 20 мкм (10 мг/см^), керн никелевый, cf*'= 6 мкм]

т. к	/э,А/см=	*S исп > Г/(СМ2-С)	эКсп-Кл/г	ММ[1]	срок службы, ч
500	10-6	—	—		—
600	4-10-^				–
700	7-10-3				–
800	4-10-2		–		–
900	0,4				
1000	3,0	5-10-»	6-10'в	3,2-10-'	5000
1100	12	2-10-9	6-10»	1,3-10-Б	115
1200	50	8-10-8	6-108	5,2-10-«	3
1300	200	I-10-в	2-108	6,5-10-3	0,23

•**Минимальная толщина активного слоя, при которой термокатод сохраняет работоспособность.**

Значения для BaO. Для BaO— SrO-термокатодов скорость испарения несколько меньше.

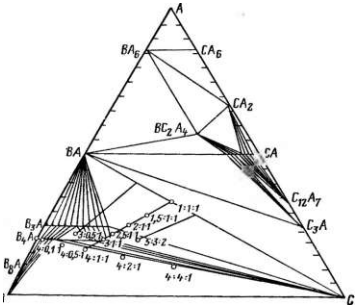


Рис. 25.9. Фазовая диаграмма оксидного катода (система BaO—CaO—AЬOз) [10], определенная при 7'=1250°С: **В=BaO; С==CaO; Л^АЬОз. Существенные композиции отмечены кружками, а их мольные отношения даны как В : С : А**

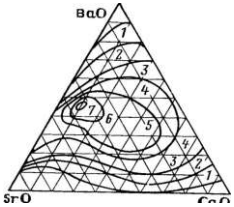


Рис. 25.10. Эмиссионная способность оксидов разного состава [12]:
цифры у кривых — значения импульсного тока, А/см®

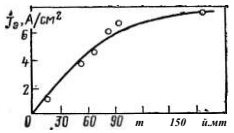


Рис. 25.11. Зависимость плотности стабильного тока ТЭ эмиссии BaO—5rO-оксидного катода от толщины слоя оксида *d* [13]

"аблица 25.8. Рекомендуемые режимы работы оксидных катодов [2]

/э. А/см»

Непрерывный режим токоотбора		
0,05	1000—1040	20 000
0,15	[000—1070	5000
0,20	1070—1100	3000
0,30	1070—1100	2 000
Импульсный режим токоотбора		
3,0	1000—1040	10000
5,0	1000—1040	5000
6,0*1	1070—1100	3 000
10,0*1	1070—1100	2 000
2,5*2	1070—1100	3000
4,0*2	1070-1100	2 000

" Длительность импульса — микросекунды.
**** Длительность импульса — сотни микросекунд.**

Таблица 25.9. Термоэмиссионные характеристики и срок службы прессованных металлопористых оксидно-никелевых катодов [7]

т. к	**/э, А/см»**	**Срок службы, ч**	**Режим отбора тока**
1200	0,5	5000	Стационарный
1220	**0,5**	5000	
1270	**1**	5000	
1340	3	3000	»

Таблица 25.10. Термоэмиссионные константы бч)Идов, позволяющие рассчитать по формуле == <fo + {a<f/aT) T и коэффициент вторичной [7]

Соединение	**e<p«. эВ**		**Коэффициент эмиссии о**
ВаВв	3,45	7,5	
СеВ,	2,59	2,3	0,68
СгВа	3,36	–	0,77
DyBe	3,53	1,5	0,8
Егв;	3,37	2,3	

продолжение табл. 25.10

Соединение	SB	ed>f/dT. 10- ЭВ/К	Коэффициент вторичной эмиссии а
EuBe	4,9	—	—
GdBe	2,05	4,0	0,8
HoBe	3,42	1,6	0,7
LaBe	2,68	1,4	0,95
$LuB_{«}$	3,0	1,6	0,8
MnB2	4,14	–	–
NdB,	3,97	1,6	0,8
PrBe	3,46	2,5	0,8
ScB®	2,96	2,3	0,58
SrBe	2,67	2,5	–
TbBe	3,26	–	–
ThB	2,92	2,0	–
TiB,	3,88	–	0,82
	3,38		
	3,95		0,8
YB,	2,22	2,18	1,0
YbBg	3,13	3,0	
ZrB;	3,67	2,0	0,85

Таблица 25.11. **Термоэмиссионные свойства гексаборида лантана** LaBe [6, 8] (р = 2,61 г/см^, еф = 2,68 эВ)

					срок службы тода с косвенг подогревом.
160С	1-10-11	**4,0-101»**	1,4-10-'	2-10«	7-10В.
170С	ЫО-ю	1,0-1010	1,4-10-е	2150	7-10*
180С	ЫО-9	3,0-108	1,4-10-Б	215	7-10'
190С	9-Ю-»	**9,5-108**	1,210-«	25	800
200С	7-10-8	**3,6.108**	1,0- ш-з	3	100
2I0С	6-10-'	1,7-108	8,3-Ш-з	0,35	12
220С	4-10-е	**1,0-108**	5.55-10-^	0,05	1,8

Таблица 25.12. **Термоэмиссионные свойства прессованных термокатодов различного состава [7]**

Катод (массовый состав, %)	г, "С	/э. *А/см"*	
		Импульсный режим	Оацнонарный режим
ThH2 + W2C +W (0,5 + + 10 + 89,5)	1700	—	
W + ThOa (96 + 4)	1500	0,8	
	1600	2,0	
W + Th02 + B(95+4+1)	1370		0,4

Продолжение табл. 25.12

Катод (массовый состав. %)	г, "С	*А/СМ"*	
		Импульсный режим	Стацио-нарный режим
W + Th02+B(97,5-b2 + 0,5)	1370	—	0.4
W + LaaOs (70 + 30)	1300	–	1,4
W + NdjOg (70 + 30)	1300		0,5
W 4- GdaOg (70 + 30)	1400		0,4
W-i-[75%Gd203 + + 25% La^Og] (70 + 30)	1400	–	0,86
W + Th (пропитанный)	1600		2-3

Т'абл! ца 25.13. **Высокотемпературные термокатоды [14]**

Катод	г, "С	Уэ, *А/СМ"*	Срок службы, *ч*
	1580	7	7000
Mo - C^^LajOs — Pt	1570	5	
Ir —La	1430	4	4500
Re-LaBe	1400	3	1500
W — Re — Y	1440		800
W —Re —Nd	1730	2	500
ZrC-W	1780	1	10 000
ZrC-W, ZrC-Mo	2030	I	9000

Таблица 25.14. **Работа выхода e^f, теплота испарения *Q* и критерий качества *q=e<IQ* тч)мокатодов [7j**

Тип катода	*e<(*, эВ	<3 эВ	*ef/Q*	*Т.* к, при долговечности	
				10 000 ч	1000 ч
Вольфрамовый	4,54	8,0	0,57	2300*	2500*
Танталовый	4,2	7,9	0,53	2000*	2200*
Ториево-оксидный	3,2	7,6	0,42	1770	1870
Боридный	2,8	6,8	0,41	1720	1870
Вольфрамово-бариевый	2,1	4,7	0,45	1300	1420
Оксидный	1,6	4,0	0,4	1030	1100

25.4. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Фотоэлектронная эмиссия (ФЭ) — эмиссия электронов, вызываемая облучением тел электромагнитным излучением [15—21].

Приведем основные законы ФЭ:

1. Фототок в режиме насыщения прямо пропорционален интенсивности падающего излучения.

2. Для каждого вещества существует длинноволновая граница К- При %>%о ФЭ не происходит. С длинноволновой границей связана пороговая частота ve—cl%a *(с* — скорость света) и пороговая энергия или фотоэлектрическая работа выхода hvo-

3. Максимальная кинетическая энергия фотоэлект-

ронов линейно возрастает с частотой падающего излучения и не зависит от его интенсивности.

Эти законы нарушаются при очень больших плотностях потока падающего излучения 1 Вт/см^), когда становятся существенными многофотонные процессы.

Перечислим основные характеристики фотокатсдов:

Квантовый выход (Fxd^v). электрон/фотон — число вышедших в вакуум фотоэлектронов, приходящихся на каждый падающий на поверхность фотокатода фотон. Здесь /j,— фототек насыщения на данной длине волны;р X —интенсивность излучения на данной длине волны.

Спектральная чувствительность 0.807 K^X, мА/Вт—фототок насыщения на единицу мощности падающего на фотокатод монохроматического излучения (Я — в им).

Спектральная характеристика — зависимость S^ или У) от частоты или длины волны падающего излучения.

Интегральная чувствительность S — отношение фототока насыщения к потоку излучения стандартного источника света, за который обычно принимают вольфрамовую лампу накаливания с температурой нити 2850 К:

$$S = //f = I \quad F^\ dX\ /6831\ Fj^\ d\backslash.$$

Здесь S — в мкА/лм; S^— в мкА/Вт; К^ — относительная спектральная чувствительность человеческого глаза н Яг — граничные длины волн излучения видимого спектра.

Плотность темпового тока /т — плотность тока ТЭ иеосвещаемого фотокатода прн рабочей температуре. Темновой ток — основной источник шума в фотоэлектронных приборах. Среднее квадратическое значение шумового тока в отсутствие излучения дается формулой

где S — площадь поверхности фотокатода; Ц — ширина полосы частот регистрирующего устройства.

Фотоэмиссия из металлов. Пороговая энергия ФЭ из металлов совпадает с работой выхода. ФЭ из металлических фогокатодов при частотах излучения, не очень далеких от пороговой частоты (v.^1,5 Vo), хорошо описывается феноменологической теорией Фаулера, согласно которой

$$2 \qquad k^ \qquad + 3$$

где o~f/fiv — отношение плотности возбужденных светом электронов к плотности нормального электронного газа в эмиттере; постоянная Ричардсона. Пороговая частота ФЭ Vo строго определена только при Г=0 При 7'>0 ФЭ наблюдается вблизи порога и при частотах v<vo. Квантовый выход ФЭ из чистых металлических поверхностей в видимой области спектра имеет порядок 10"^ электрон/фотон, а при hv^lO эВ не превышает 10-2 электрон/фотон (рис. 25.12).

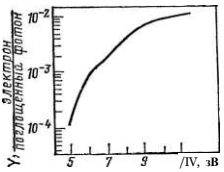


Рис. 25.12. Спектральная характеристика квантового хода ФЭ с чистой поверхности меди [18]

Фотоэмиссия из **полупроводников, в** полупроводниках ФЭ может быть обусловлена возбуждением электронов из валентной зоны, с уровней примесей, дефектов, поверхностных состояний и из зоны проводимости (в вырожденных полупроводниках «-типа). Для каждого из этих случаев пороговая частота имеет свое значение. Обычно, если иное не оговорено, под фотоэлектрической работой выхода понимают минимальную энергию фотонов, при которой начинается ФЭ из валентной зоны полупроводника (табл. 25.15). Это значение, как правило, превосходит работу выхода. Спектральная зависимость квантового выхода ФЭ вблизи порога в полупроводниках имеет вид

где m=l-i-3 в зависимости от типа оптических переходов и механизма рассеяния фотоэлектронов. Квантовый выход ФЭ из полупроводников зависит от электронного сродства X — энергии, необходимой для перевода электрона со дна зоны проводимости на уровень вакуума Все эффективные фотокатоды имеют малое значение %, так что *%fEg<l.* Квантовый выход фотоэмиссии полупроводников с уJEg>\ мал (рис. 25.13).

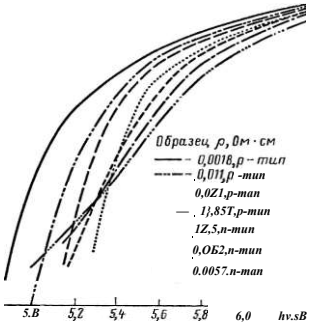


Рис. 25.13. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для образцов кремния п- и р-типов с различной степенью легирования x/E^~4 [16]

Снижение работы выхода полупроводников путем адсорбции на их поверхности электроположительных атомов (цезия, бария и других) приводит к уменьшению X и резкому увеличению квантового выхода. В случае GaAs, GaP, Si и ряда других полупроводников совместная адсорбция цезия и кислорода приводит к столь сильному снижению работы выхода, что реализуется условие отрицательного электронного сродства (ОЭС). Полупроводники с ОЭС обладают наибольшим квантовым выходом в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Эффективные фотокатоды. Все эффективные фотокатоды — полупроводники. Металлы имеют высокий квантовый выход (около 0,1 электрон/фотон) только в области /iv> 12 эВ и обычно при наличии на их поверхности оксидных пленок.

Эффективными фотокатодами для области спектра Я<200 нм ***(hv>6*** эВ) являются щелочногалоидные соединения (Csl, CsBr и другие), иодид меди и галоидные соединения серебра. Высокий квантовый выход в области ?1=200-ь350 нм получен на теллуриде цезия (Cs₂Te) и теллуриде рубидия (RbgTe). Следует отметить, что эти фотокатоды относятся к категории так называемых солнечно-слепых, т. е. фотокатодов, чувствительных в ультрафиолетовой области спектра, но не реагирующих на излучение Солнца. Рассмотренные ниже фотокатоды для видимой области спектра имеют высокий квантовый выход и в ультрафиолетовой области.

Фотокатоды, чувствительные в видимой области спектра, представляют собой антимониды щелочных ме^ таллов. Некоторые из них (CsNagKSb) чувствительны и в ближней инфракрасной области спектра, вплоть до 7.=850 н-900 нм. До последнего времени единственным фотокатодом в области ?1=900-н1100 нм был Ag—O— — Cs-фотокатод. В настоящее время разработан новый класс фотокатодов — с ОЭС. Фотокатоды с ОЭС представляют собой сильнолегированные полупроводники р-типа (GaAs, Si, твердые растворы GalnAs, InGaAsP и другие), работа выхода которых сильно снижена адсорбцией цезия и кислорода, так что уровень вакуума находится ниже дна зоны проводимости в полупроводнике. Они обладают наивысшей чувствительностью в красной и инфракрасной областях спектра.

В области Я>],1 мкм высоким квантовым выходом обладают только фотокатоды на основе полупроводниковых гетероструктур с внешним смещением (InGaAs — InP — Ag ~ CsO). Длинноволновая граница таких фотокатодов определяется шириной запрещенной зоны узкозонного полупроводника (InGaAs), в котором происходит поглощение света. Сильное электрическое поле переводит фотоэлектроны из InGaAs в верхний слой InP и увеличивает их энергию до значения, превышающего уровень вакуума. Фотокатоды такого типа обладают чувствительностью в области до 1,7 мкм. В табл. 25.16, 25.17 и на рис. 25.14—25.26 приведены характеристики наиболее распространенных фотокатодов.

Таблица 25. 15. Ширина запрещенной зоны Eg, сродство к электрону i и порог фотоэмиссии различных полупроводниковых материалов [16]

Материал	ЭВ	X. эВ	ftv^.sB
Антимонид:			
галлия	0,7	4,1	5,5
индия	0,2	4,6	4,8
магния	0,8	3,0	3,8
Арсенид галлия	1.4	4,1	5,5
Арсенид индия	0,4	4,9	5.3
Аурит цезия	2,6	1.4	4
Бромид серебра	2.5	3,5	6
Германий	0.7	4,2	**4.9**
Иодид:			
калия	6.2	1,1	7,3
лития	5,9	1,4	7.3
меди	3	3	6
натрия	5,8	1.5	7.3
рубидия	6,1	1,2	7,3
цезия	6,3	0,1	**6.4**
Карбид кремния:			
гексагональный	2,9	4,1	7
кубический	2.2	4.8	7

Продолжение табл. 25. 15

Кремний	1,1	4	5,1
Оксид бария	3,7	1,3	5
Оксид магния	8.7	I	10
Селен	1.8	4.2	6
Селенид кадмия	1.7	5.3	7
Сульфид кадмия	2.4	3.8-4,8	**6.2–7.2**
Сульфид свинца	0.4	4,2	**4.6**
Теллур	0.3	4.6	**4.9**
Теллурид:			
висмута	0.1	5.2	**4,3**
кадмия	1.5	4.4	5,9
свинца	0,3	4.7	5
рубидия	3,3	<0,5	3.7
цезия	3,3	<0,5	3,5
Титанат бария	2,7	**2,6**	5,3
Фторид лития	12	1	13
Фосфид индия	1,3		5,7
Хлорид серебра	3		

Таблица 25.16. Свойства фотокатодов на основе антимонидов щелочных металлов [15, 16, 40, 41]

Фотокатод	Кристаллическая структура		λ_m, нм	S, мкА/лм	E^.эв	Z. эв	тип проводимости	
LigSb	Гексагональная	—	320	—	1,0	2,9	*n*	
NasSb	»	0,02	330	—	1,1	2,5	*n*	
KsSb	Кубическая	>0,07	550	12	1,4	0,9	*p*	
KjSb	Гексагональная	0,07	460	2	1,1	1,6	*n*	–
RbgSb	Кубическая	0,10	580	25	1,0	1,2	*p*	–
CsŠb		0,15-0,25	620—700	40—80	1,6	0,45	*p*	10-1в
Na,KSb		0,30	600-670	30—60	1.0	1,0	*p*	10-1'
KjCsSb		0,30	650-700	50-100	1,0	1,1	*p*	10-"
K^CsSb (о)		0,35	780	130	1,0	<1,1	*p*	10-16
CsNa^KSb		0,30—0,40	870-940	300	1,4		*p*	10-16
RbjCsSb		0,30	680-750	130	1,45	0,2		10-1'

Таблица 25.17. Параметры основных фотокатодов для видимой и ближней инфракрасной областей спектра [16, 18]

Фотокатод	НМ		Spp, *KKhlmn*	S^, мкА/лм	А/СМ"
CSgSb	**620—700**	**0,2—0,25**	**40-80**	**120**	**10-16- 10-15**
KsCsSb	**650-700**	**0,3—0,4**	**55—65**	**200**	**10-1'**
CsNa^KSb	**900-940**	**0,3-0,4**	**200-250**	**450**	**10-16**
Ag-O-Cs	**1200**	**0,005**	**20—40**	**70**	**10-13 —10-11**
GaAsP-Cs —O	**680**	**0,5**	**200—300**	**375**	**<10-w**
GaAs —Cs —O	**900**	**0,3**	**800-1400**	**2150**	**10-14— 10-16**
InGaAsP - Cs — **O**	**1100-1150**	**0,2**	**200—500**	**1640**	**10-11 — 10-1»**
Ino.53Gao.47As - -InP-Ag- -Cs-O	**1700**	**0,08**			

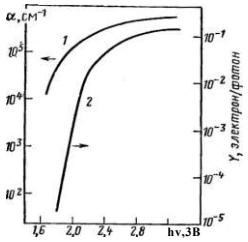
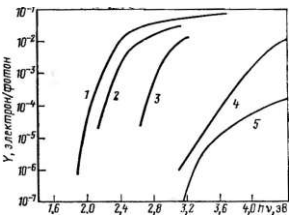


Рис. **25.14.** Спектральные характеристики коэффициента поглощения а (/) и квантового выхода ФЭ *(2)* для фотокатода из CssSb [16]



Ри& **25.15.** Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов на основе антимонидов щелочных металлов:
/ —RbsSb; г —KaSb с кубической структурой; 3 — KsSb с гексагональной структурой; 4 —NaaSb; 5 — LiaSb [16]

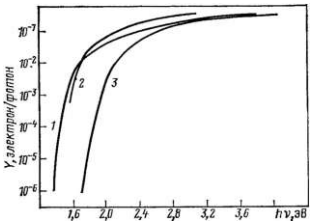


Рис. 25.16. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для многощелочного и бищелочных фотокатодов:
^-CsNa2KSb: 2-K2CsSb(0); 3 - NajKSb [16]

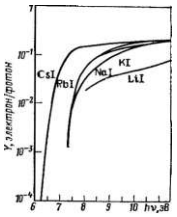


Рис. 25.19. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для иодидов щелочных металлов [16]

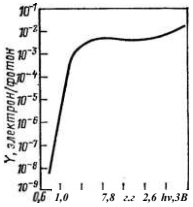
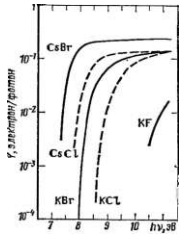


Рис. 25.17. Спектральная характеристика квантового выхода ФЭ для фотокатода из Ag—O—Cs [16]



Рис, 25.20. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для некоторых щелочногалоидных соединений [16]

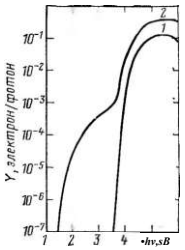


Рис. 25.18. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатода из CsgTe без избытка цезия *(1)* и с избытком цезия *(2)* [16]

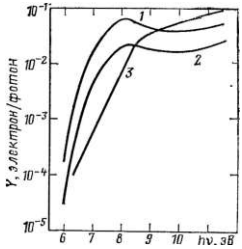


Рис. 25.21. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для некоторых галоидных соединений серебра:
/ — монокристалл AgBr; 2 — плавленый AgBr; 3 — AgCl [16]

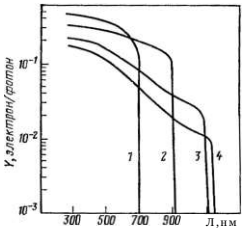


Рис. 25.22. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов с ОЭС: i-GaAsP; 2-GaAs; *3.* 4 - InGaAsP с разной шириной запрещенной зоны [18]

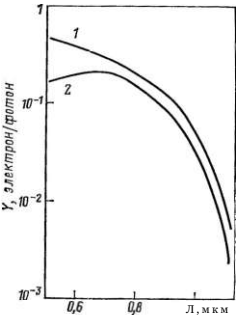


Рис. 25.25. Спектральные характеристики квантовог(выхода ФЭ для кремниевого фотокатода при освещени! «на отражение» *(1)* и «на просвет» (2) [211

70-4

7Л 1.8 2,2 2,Б hv,3B

Рис. 25.23. Спектральная характеристика квантового выхода ФЭ для полупрозрачного фотокатода из

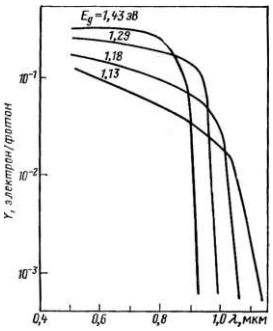


Рис. 25.24. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов из Gai_x In* As с различной шириной запрещенной зоны: fg^ 1,43 эВ *x=0;Eg*— =1,29 эВ x=0,1; £g=l,18 эВ X=0,17, £g=1,13 эВ x=0,2[20]

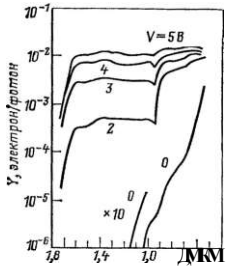


Рис. 25.26. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов из InGaAs — InP — Ag—Cs—O, при различных значениях внешнего смещения [191

Рентгеновская фотоэлектронная эмиссия (РФЭ) возникает под действием рентгеновского излучения и связана с переходом фотоэлектронов с глубоких атомных уровней в вакуум. Характерной особенностью фотоэлектронных спектров РФЭ является наличие узких линий, соответствующих фотоэлектронам, которые вышли из тела без рассеяния энергии (табл. 25.18 и рис. 25.28—25.30). При использовании длинноволнового рентгеновского излучения (/tv=l кэВ) энергия эмитированных электронов составляет несколько сот электрон-вольт. Длина свободного пробега таких электронов равна 0,5—2 им (рис. 25.27), так что линейчатая часть спектров РФЭ отражает свойства приповерхностного слоя толщиной до пяти монослоев. Эта особенность спектров РФЭ позволяет использовать их для анализа состава поверхности в рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС). Энергии для химических элементов в соединениях различаются на несколько электрон-вольт. Так, для углерода энергия фотоэлектронной I s-лиiии меняется от 281 (HfC, TiC) до 292 эВ (CDs)- Этот эффект, обычно называемый химическим сдвигом, дает возможность получать с помощью РФС информацию не только о составе поверхности, но и о химических

Таблица 25.18. Энергия основных фотоэлектронных рентгеновских линий (энергия связи) химических элементов (ftv = 1486,6 эВ) и относительное сечение фотоионизации для этих линий. Сечение фотоионизации 1 s-линии натрия принято за единицу [37, 39]

Элемент	Средняя энергия линии, эВ	Диапазон энергии линии, эВ	Относительное сечение фотоионизации
	Is-переход		
зЬI	56		0,009
дBe	113	4	0,033
	191	8	
	287	12	0,127
	402	9	0,188
	531	4	0,338
	686	6	0,480
loNe	863	0	
	1072	2	1,000
12%	1305	2	
	• переход		
13A1	74	1 4	1 0,086
	2p^^^.переход		
	102	6	
	133	8	0,141
	165	8	0,163
	199	11	0,198
	241	0	—
	293	1	0,424
.„Ca	347	2	0,377
	402	6	
	458	8	Z
1	515	6	0,421
26Мп	577	6	0,522
26Pe	641	4	0,478
27Co	710	8	0,865
28Ni	781	6	0,777
2.CU	855	6	0,836
3oZn	934	4	1,500
siGa	1022	2	0,135
S2Ge	1117	2	0,200
	1219	4	0,210
	1329	7	0,180
	Sd^^^-перехоd		
34Se			0,239
			0,262
	110		0,284
3sSr	133		0,380
Sfll	158		0,430

Продолжение табл. 26.1 Продолжение табл. 26.1

Элемент	Средняя энергия линии, эВ	Диапазон энергии линии, эВ	Относительное сечение фотоионизации
4oZr	181	6	0,570
«Nb	206	8	0,564
42Mo	230	6	—
43TC	253	—	—
44RU	282	4	0,846
«sRh	309	4	0,990
4ePd	337	5	0,894
47Ag	368	2	1,170
«Cd	405	2	1,410
49 In	445	3	1,880
Zsn	486	3	2,35
51Sb	530	4	2,81
52Tb	575	Б	1,89
63I	619	6	1,88
54Xe	672	4	—
5BCS	724	2	3,12
5nBa	780	2	2,70
67La	834	—	1,00
58Ce	882	—	1,00
59Pr	930	—	1,00
eoNd	980	—	1,51
eiPm	1034	—	–
eaSm	1083	–	1,21
63Eu	1136	—	1,24
	1186	—	1,91
	1244	—	—
	1295	—	—
	4d^^^-перехоd		
„Ho	161		
	169		
	180		
^oYb	185		
MLU	197		
	4f^^^-перехad		
	17	6	0,427
йTa	25	8	0,660
	34	6	–
	43	6	0,885
	52	3	0,625
	62	4	0,860
	73	5	0,86
	85	3	1,04
	100	2	1,14
	118	2	1,17
	138	3	1,507
"Bi	159	4	1,67
92Th	335	3	3,30
	380	5	3,34

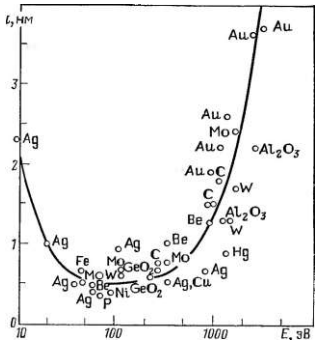


Рис. 25.27. Зависимость средней глубины выхода / Е тронов из твердых тел от энергии электронов [23]

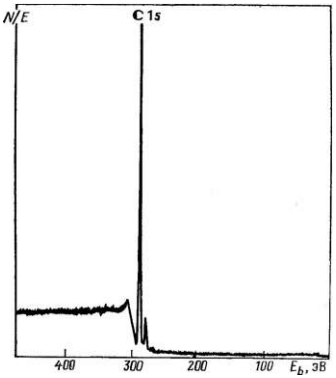


Рис. 25.28. Фотоэлектронный рентгеновский спектр углерода (мишень — полиэтилен) [39]:
по оси абсцисс отложена энергия связи электрона в атоме

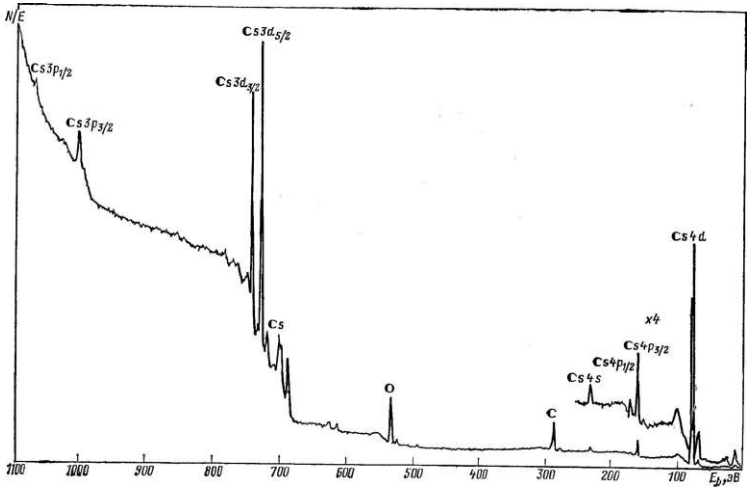


Рис. 25.29, Фотоэлектронный рентгеновский спектр цезия (мишень — CsOH) [39]:
по оси абсцисс отложена энергия связи электрона в атоме

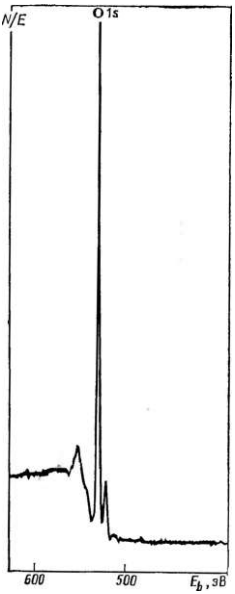


Рис. 25.30. Фотоэлектронный рентгеновский спектр кислорода (мишень — АЬОв) [39]:
по оси абсцисс отложена энергия связи

25.5. ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) — эмиссия электронов, вызываемая бомбардировкой тел электронами.

Основные закономерности ВЭЭ. Электроны, бомбардирующие поверхность тела, называются первичными; электроны, эмитированные телом, — вторичными. Вторичные электроны могут эмитироваться как со стороны облучаемой первичным пучком поверхности тела (ВЭЭ «на отражение»), так и — в тонкопленочных эмиттерах — со стороны поверхности, противоположной облучаемой (ВЭЭ «на прострел») Основной характеристикой вторично-электронных эмиттеров является зависимость а — коэффициента ВЭЭ от энергии Ер первичных электронов. Коэффициент ВЭЭ есть отношение числа электронов Ni, испускаемых телом, к числу падающих на него за то же время первичных электронов ***N,: g^N^IN/^*** — первичный и вторичный токи соответственно). Значение о зависит от свойств и структуры эмиттера, состо^ния его поверхности, энергии нервичиых электронов Ер и угла падения первичного пучка на поверхность эмиттера.

В потоке вторичных электронов имеются две группы электронов; истинно вторичные — электроны вещества, которые получили от первичного пучка энергию, достаточную для их выхода в вакуум, и отраженные (упруго и неупруго) — часть первичного пучка, отраженная от тела. При малых ***Ер {Ёр<10*** эВ) основную долю вторичных электронов составляют упруго отраженные электроны. С ростом ***Ер*** доля упруго отраженных электронов уменьшается и при £„>0,1 кэВ дает лишь несколько процентов всей ВЭЭ. Истинно вторичные электроны имеют энергию ог О примерно до 50 эВ. Наиболее вероятная энергия истинно вторичных электронов составляет 1,5—3,5 эВ. Неупруго отраженными условно принято считать вторичные электроны, энергия которых превышает 50 эВ. Отношение числа неупруго отраженных электронов к числу первичных электронов называется коэффициентом неупругого отражения Т|=**JV**2 (£р> >50 эВ)/Л^1 (в Nn входят и упруго отраженные электроны, но число их мало и на значение ti не сказывается).

ВЭЭ из металлов и полупроводников. В металлах и полупроводниках максимальное значение От обычно лежит в пределах 0,5—1,8 (табл. 25.19—25.21 и рис. 25.31—25.38). В некоторых диэлектриках (щелочиогалоидиые кристаллы, MgO) От значительно больше (10—35). Это обусловлено большой глубиной выхода вторичных электронов из этих материалов (20—100 им). Наличие в диэлектрике сильного электрического поля, иаправлеииого от эмитирующей поверхности в глубь слоя (т. е. ускоряющего вторичные электроны), приводит к значительному увеличению о. Сильное поле обычно создается электронной бомбардировкой тонкого слоя диэлектрика на проводящей подложке при такой , энергии ***Ер,*** что а>1. В результате поверхность диэлектрика заряжается положительно относительно металлической подложки. Ток ВЭЭ, возникающий в присутствии сильного электрического поля в эмиттере, состоит из двух компонент: малоиерциоииой (эта часть называется вторичной электронной эмиссией, усиленной полем, ее инерционность менее 10-® с) и самоподдерживающейся, существующей и при отсутствии первичного пучка, после того как осуществлена первоначальная зарядка слоя

Эффективные эмиттеры вторичных электронов. Эффективные эмиттеры фотоэлектронов: сурьмяно-цезиевый, многощелочной, фотоэмиттеры с ОЭС и другие — одновременно являются эффективными эмиттерами вторичных электронов. Широкое распространение получили также эффективные эмиттеры вторичных электронов на основе сплавов магния, бериллия и некоторых других элементов. Эти эмиттеры представляют собой слой оксида соответствующего металла на поверхности исходного сплава (Ag—Mg, Al—Mg, Си—Be, Ni—Be и т. п.). В канальных вторичных электронных умножителях используются эмиттеры вторичных электронов из проводящих стекол.

Характеристики эффективных эмиттеров вторичных электронов приведены в табл. 25.22—25.24 и иа рис. 25.39—25.43, где Ер т— энергия первичных электронов, при которой достигается максимальное значение коэффициента вторичной электронной эмиссии От.

Таблица 25.19. Коэффициенты ВЭЭ для различных поликристаллов [22]

Элемент		эВ	Элемент		^рт'
Алюминий	0,88	300	Никель	1,34	600
Барий	0,83	400	Ниобий	1,2	370
Бериллий	0,55	200	Олово	1,43	600
Бор	1,2	150	Осмий	1,7	750
Висмут	1,32	900	Палладий	1,75	550
	1,4	700	Платина	1,8	850
	1,08	500	Рений	1,6	750
Гафний	1,16	700	Ртуть	1,63	700
Германий	1,08	400	Селен	1,23	300
Железо	1,3	350	Серебро	1,70	800
Золото	1,81	900	Скандий	0,83	200—250
Индий	1,41	500	Свинец	1,4	700
Иридий	1,8	800	Стронций	0,72	400
Иттрий	0,93	350	Сурьма	1,19	600
Кадмий	1,59	800	Таллий	1,30	700
Калий	0,53	170	Теллур	1,22	450
Кальций	0,60	200	Титан	0,83	**300**
Кремний	1,03	300	Торий	1,14	**600-1000**
Лантан	1,03	500	Углерод	1,0	300
Литий	0.48	75	(графит)		
Магний		300	Цезий	0,72	400
Медь	1,'40	700	Циик	1,41	700
Молибден	1,23	600	Цирконий	1,1	350

Таблица 25.20. Коэффициенты ВЭЭ для некоторых оксидов и халькогенидов [22]

Соединение		
Оксид:		
бора	2,5-2,8	250
сурьмы	1,6—1,8	
теллура	1,7-1,85	600
свиица	1,8-2,0	600
Селенид:		
висмута	1,25-1,35	600—700
индия	1.3-1,5	300-350
кальция	1.4-1,6	300-350
мышьяка	1.1-1,4	400
сурьмы	1.2-1,4	500-600
Сернистая сурьма	1,1-1,35	450-500
Сернистый:		
мышьяк	1,5-1,8	300
свиицо	1,25—1,3	500
германий	1-1,05	400
Теллурид:		
мышьяка	1.1-1,3	400
сурьмы	1.2-1,35	700-800

Таблица 25.21. Анизотропия вторично-эмиссионных свойств монокристаллов [4]

Металл	Параметр ВЭЭ	Плоскости монокристаллов						Поликристаллы
		(Ш)	(III)	(Ю)	(116)	(112)	(102)	
Вольфрам	**£** эВ	1,66 780	1,58 670	1,48 550-720	1,39 820	-	-	
Железо	•^*pirf* эВ	—	–	1,34 460	—	-	—	1,30 350
Иридий		2,11	1,85	1,95	–	–	–	**1,80**
	Ept, эВ	650	650	650	–	–	–	**800**
Молибден		1,52—1,58	1,4—1,45	1,35		1,14	125	1,28
	эВ	350—400	350-510	400-460	—	720—760	550	400
Никель	*°m*	-	1,52			-	–	1,34
	Ept, эВ		770	—	—			600
Ниобий	эВ	350—820	1,29 360	1,25—1,34 380-880	–	-	–	1,20 370
Тантал		1,43			—	1,25		1,3
	эВ	750	–	-		740	-	700

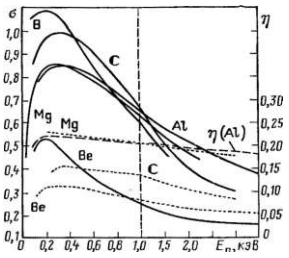


Рис. 25.31. Зависимость коэффициента ВЭЭ сг (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов т] от энергии первичных электронов для бора, углерода, бериллия, магния и алюминия [22]

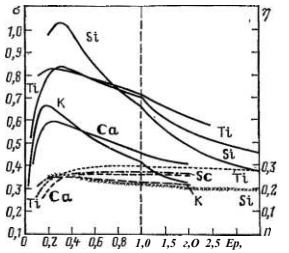


Рис. 25.32. Зависимость коэффициента ВЭЭ с (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов т) от энергии первичных электронов для калия, кальция, скандия, титана и кремния [22]

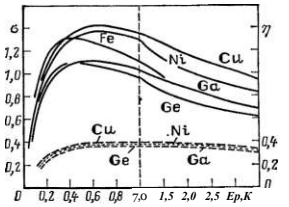


Рис. 25.33. Зависимость коэффициента ВЭЭ о (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов Т] от энергии первичных электронов для железа. никеля, меди, галлия и германия [22]

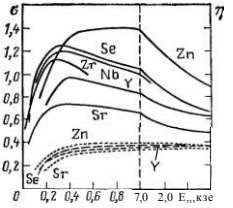


Рис. 25.34. Зависимость коэффициента ВЭЭ 6 (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов т) от энергии первичных электронов для цинка, селена, стронция, иттрия, циркония и ниобия [22]

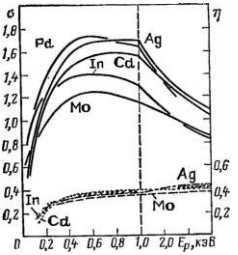


Рис. 25.35. Зависимость коэффициента ВЭЭ а (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов Т) от энергии первичных электронов для молибдена, палладия, серебра, кадмия и индня [22]

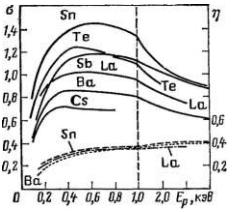


Рис. 25.36. Зависимость коэффициента ВЭЭ с (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов Т] от энергии первичных электронов для олова, сурьмы, теллура, цезия, бария и лантана [22]

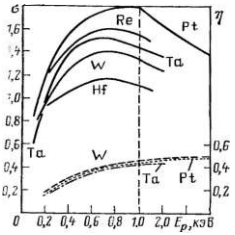


Рис. 25.37. Зависимость коэффициента ВЭЭ о (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов т] от энергии первичных электронов для гафния, тантала, вольфрама, рения и платины [22]

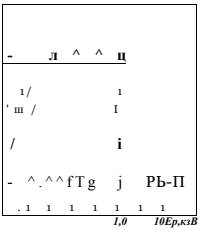


Рис. 25.38. Зависимость коэффициента ВЭЭ а (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов т| от энергии первичных электронов для золота, ртути, таллия, свинца и висмута [22]

Таблица 25.22. Максимальные значения коэффициента ВЭЭ для эффективных эмиттеров [13]

Эмиттер		
CsNa,KSb	39	1,8
CsjSb	10	0,5
Qi-Be	6-8	0,6
Ag-.Mg	12	0,6
Gap (100) (монокристалл) — CsO	500	12
GaP (поликристалл) — CsO	200	4
GaAs(lOO) - CsO	540	20
Si (100) - CsO	950	20
GaAso.5Po,5(100)-CsO	110	1,7
CsCl	20	2
Csl	20-35	1,7-5,5
CaF^	5	1,4
MgO	20	0,9

Таблица 25.23. Коэффициенты ВЭЭ эффективных эмиттеров «на прострел» [24]

Эмиттер	а при Ер, кэВ				
	2	Б	10	15	20
KCl	0,5	4,2	2	2	2
MgO	2	5	4	–	–
Si-CsO	0	50	200	520	725
GaAs-CsO	0	2	15	60	112

Таблица 25.24. Коэффициенты ВЭЭ для эффективных эмиттеров при малых энергиях первичных электронов Ер [24]

Эмиттер	– при ЭВ		
	300	1 600	1000
CuBe	2—4	4—6	7—12
CuAlMg	2-4	3-7	7-16
CssSb	2—6	4—15	3—12
CsNa^KSb	3-5	7—11	10—19
GaP (поликристалл) —CsO	28	50	68
OaA8(поликристалл) -CsO	26	42	65

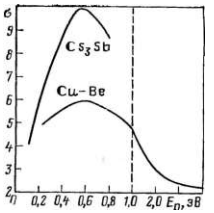


Рис. 25.39. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для CsaSb и медно-бериллиевого сплава [15]

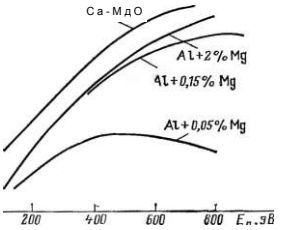


Рис. 25.40. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для алюминий-магниевого и медно-магниевого сплавов [15]

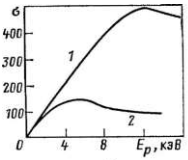


Рис. 25.41. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для моно- *(1)* и поликристаллического *(2)* GaP—CsO-эмиттеров

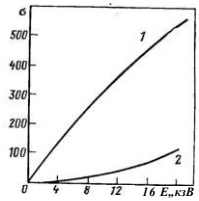


Рис. 25.42. Зависимость коэффициента ВЭЭ для GaAs—CsO-эмиттеров от энергии первичных электронов «на отражение» *(1)* и «на прострел» (d=3-b4 мкм) (2) [261

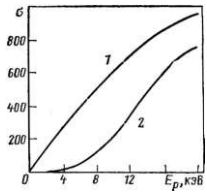


Рис. 25.43. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для Si—CsO-эмиттеров «на отражение» (/) и «на псострел» (d=4-^5 мкм) (2) [25]

Эмиссия оже-электронов (ЭОЭ). В спектрах вторичных электронов имеются узкие линии, соответствующие вторичным электронам, возникшим в результате оже-процесса, протекающего при бомбардировке тела первичными электронами, которые вышли из тела без рассеяния (табл. 25.25 и рис. 25.44—25.46). Этот процесс состоит в следующем. При возбуждении атома первичными электронами происходит переход электрона с какого-либо внутреннего уровня (например, К) в свободное состояние выше уровня вакуума. Освободившийся

Таблица 25.25. **Энергия основных пиков оже-электронов £о.э Для различных элементов**

Элемент		E^* при Ер - 3 кэВ
	KLL-переход	
3Li	43	–
4Be	104	0,14
бВ	J 79	0,15
вС	272	0,2
N	379	0,3
80	503	0,5
	647	0,48
LNa	900	0,22
laMg	1180	0,11
13AI	1396	0,05
	LMM-переход	
13AI	68	0,24
l4Si	92	0,35
15P	120	0,55
leS	152	0,8
i Cl	181	1
l Ar	215	–
1.K	252	0,8
2oCa	291	0,5
2iSc	340	0,35
	418	0,45
23V	473	0,45
24CT	529	0,32
25MII	589	0,23
	703	0,21
	775	0,27
28Ni	848	0,26
29CU	920	0,22
3oZn	994	0,17
	1070	0,13
32Ge	1147	0,1
33AS	1228	0,08
34Se	1315	**0**,065
35BI	1396	0,05
37Rb	1565	0,03
Sr	1649	0,025
39Y	1746	0,02

Продолжение табл. 25.25

Элемент	*Eo.b-* эВ	при Ер 3 кэВ
	MNN-переход	
4oZr	147	0,22
4iNb	167	0,26
42Mo	186	0,33
44RU	273	0,5
« Rh	302	0,65
4ePd	330	0,8
	351	1
48Cd	376	1
49ln	404	0,95
6oSn	430	0,8
5Sb	454	0,6
	483	0,45
	511	0,32
B4Xe	532	
	563	0,16
5«Ba	584	0,12
5,La	625	0,09
5"Ce	661	0,065
59PT	669	0,05
,«Nd	730	0,04
eaSm	814	0,028
3Eи	858	0,026
e4Qd	895	0,024
5Tb	1073	0,024
eDy	1126	0,024
erHo	1175	0,024
esEr	1393	0,025
esTm	1449	0,027
™Yb	1514	0,03
nLu	1573	0,036
72Hf	1624	0,045
73Ta	1680	0,055
4W	1736	0,05
,5Re	1799	0,04
	1908	0,027
> t	1967	0,022
Au	2024	0,019
8oHg	2078	–

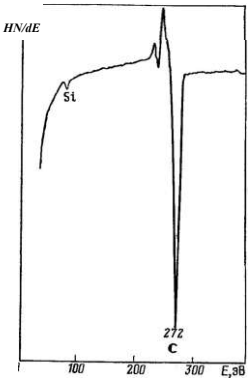


Рис. 25.44. Оже-спектр углерода [42]

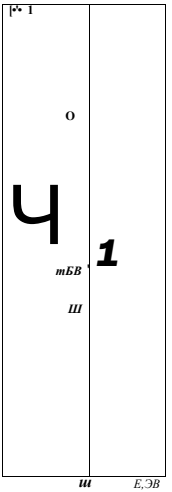


Рис. 25.45. Оже-спектр кислорода (мишень MgO) [42]

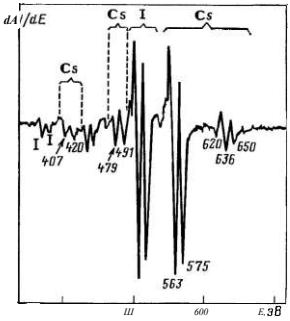


Рис. 25.46. Оже-спектр цезия (мишень Csl) [42]

уровень заполняется электроном с вышележашего уровня (например, *L).* Выделившаяся при этом энергия, которая приближеиио равна E^—E*I* (где E,^ и E*I* — энергия связи электронов на уровнях *K K L* соответственно), испускается в виде рентгеновского кванта либо передается другому электрону, находящемуся на соседнем уровне. Такой процесс приводит к эмиссии из атома электрона с энергией EF^Ц, приближенно равной Ef; — 2E*L.* Кроме серии *KLL* интенсивны также оже-серии *LMM, MNN* и др.

Энергия оже-пика характеризует данный атом, поэтому анализ спектров оже-электронов позволяет получить информацию о составе приповерхностной области твердого тела, откуда происходит ЭОЭ. Энергия оже-электронов лежит к диапазоне 30—2000 эВ. Средняя длина свободного пробега электронов с такими же энергиями составляет 0,5—2 им, так что спектры оже-электронов отражают свойства приповерхностного слоя толщиной до пяти монослоев. Амплитуда оже-пика пропорциональна концентрации атомов данного сорта на поверхности твердого тела и эффективности оже-переходов, которая характеризуется величиной, называемой оже-чувствительиостью. Она определяется числом вторичных оже-электронов с данной энергией, испущенных данным элементом, в расчете на число первичных электронов и зависит от энергии первичных электронов. Анализ спектров оже-электронов лежит в основе электронной оже-спектроскопии (ЭОС) — основного метода изучения состава поверхности твердых тел.

25.6. ПОЛЕВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Полевая (туннельная, автоэлектронная) эмиссия (ПЭ) — испускание телами электронов под действием сильного внешнего электрического поля у их поверхности. Если внешнее электрическое поле достаточно велико для того, чтобы потенциальной порог на границе тела превратился в барьер конечной и малой ширины (g^10' В/см), то становится возможным просачивание электронов сквозь барьер (квантовомеханическое туннелирование) и выход их в вакуум. При этом электроны непосредственно после прохождения сквозь барьер имеют ту же энергию, что и внутри тела, а электрическое поле совершает работу только на ускорение электронов в вакууме в межэлектродном промежутке между эмиттером

и анодом и иа нагревание эмиттера проходящим по нему эмиссионным током. Плотность тока ПЭ, А/см^ из металла при Г<20''С описывается формулой [27] (S — в В/см):

$$\text{8}\pi\text{e}/\text{кр} \quad \exp$$

где *в (у)* — функция Нордгейма (табл. 25.26), в которой аргументом является относительное снижение работы выхода внешним электрическим полем напряженностью ***Е*** в соответствии с эффектом Шоттки:

Если бф — в эВ, а g — в В/см, то плотность тока ПЭ (в А/см^)

$$/\bullet = 1{,}54\text{-}10\text{-}e\text{—} \exp \quad \tilde{} \quad \ddot{e}$$

$$\mathbf{x\ e}|$$

Отсюда видно, что ПЭ зависит от электрического поля так же, как ТЭ зависит от температуры: 1п(Цё^) = =/(1/g) (рис. 25.47). При высоких температурах плотность тока ПЭ возрастает с ***Т,*** особенно сильно в области малых (но уже вызывающих ПЭ) электрических полей. Распределение по энергиям электронов, эмитируемых из металла, при ПЭ при низких температурах эмиттера начинается от энергии, соответствующей уровню Ферми в металле (принимаемому за нуль), и простирается в область отрицательных энергий. Ширина распределения иа половине высоты составляет около 0,5 эВ (рис. 25.48). При возрастании температуры энергетический спектр эмитируемых электронов расширяется в сторону положительных энергий ПЭ полупроводников обладает рядом особенностей, связанных с распределением электронов по энергиям в них, с проникновением внешнего электрического поля в полупроводник и с сильной термо- и фоточувствительностью полупроводников, оказывающей влияние на ток ПЭ (рис. 25.49) [28, 29]. Токи ПЭ с большой плотностью удается получать с эмиттеров, имеющих форму острия. Предельная плотность тока, еще не разрушающего острие, /кр возрастает с увеличением угла при вершине эмитирующего конуса, так как с увеличением этого угла улучшается отвод теплоты от острия (табл. 25.27, рис. 25.50). В очень сильных электрических полях, когда плотность тока ПЭ достигает 108—10® А/см^ локальные участки катода, из которых происходит эмиссия, (острия) в результате сильного разогрева взрываются, образуя плотную плазму, расширяющуюся со скоростью г;— 10® см/с. Этот процесс сопровождается возникновением интенсивной эмиссии (взрывная электронная эмиссия, рис. 25.51) [30]. Ток ***I,*** А, взрывной электронной эмиссии при взрыве одиночного острия

$$/= 3{,}7\text{-}10\text{-}5\ \text{t/®}^{\wedge\wedge}\ \ vt/\{d\ —\ vt\},$$

где и — напряжение между катодом и анодом в процессе взрывной эмиссии. В; d — расстояние между ними, см; *t* — время от момента приложения импульса напряжения *(t<d/v).*

ПЭ используется в некоторых вакуумных электронных приборах, в полевой электронной и ионной микроскопии, взрывная электронная эмиссия — в сильноточных ускорителях электронов и в импульсных источниках рентгеновского излучения высокой интенсивности [30].

Таблица 25.26. Функция Нордгейма Щ [27]

V	*Ь(У)*	*У*	е *iv)*
0	1,0000	0,55	0,6351
0,05	0,9948	0,6	0,5768
0,1	0,9817	0,65	0,5152
0,15	0,9622	0,7	0,4504
0,2	0,9370	0,75	0,3825
0,25	0,9068	0,8	0,3П7
0,3	0,8718	0,85	0,2379
0,35	0,8322	0,9	0,1613
0,4	0,7888	0,95	0,0820
0,45	0,7413	1	0
0,5	0,6900		

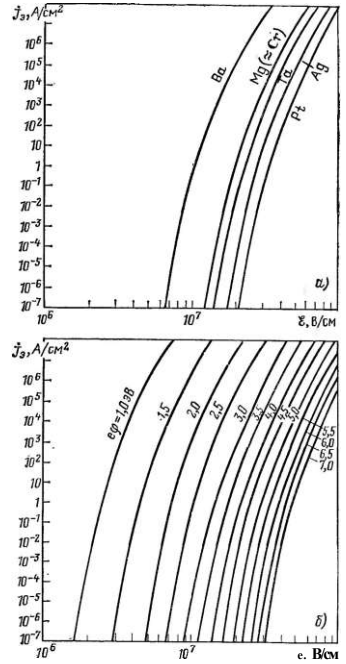


Рис. 25.47. Зависимость плотности тока ПЭ от напряженности электрического поля для некоторых металлов *(а)* и эмиттеров с различной работой выхода (б) [6]

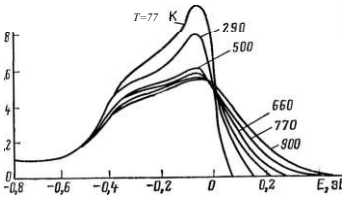


Рис. 25.48. Распределение по энергиям электронов при ПЭ из вольфрамового острия с ориентацией по оси <100> при различных температурах эмиттера [31]

Таблица 25.27. **Значения экспериментально измеренных предельных плотностей токов ПЭ с одноострийных катодов [28]**

Материал катода	Длительность прикладываемого напряжения, с j	Предельная плотность тока. А/см"
W	Постоянно действующее напряжение	10'
W	10-10-3	2-10'
W	10-®—10-е	5.10'—108
W	10-'	3.108-5-108
W	10-8—10-9	109
W-Zr	4.10-е	1-109-5-10»
Ta, Re	4.10-е	5-10'
LaB,	3-10-в	10'—108
ZrC	3.10-е	10'—108

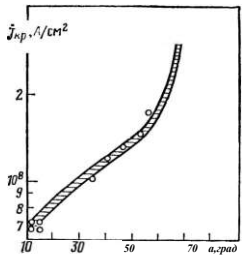


Рис. 25.50. Зависимость критической (наибольшей неразрушающей эмиттер) плотности тока ПЭ металлического острия от угла раствора конуса катода [28]. Материал катода — вольфрам, длительность импульсов тока 3,5 мкс, частота повторения 50 с"':
кружки — эксперимент, заштрихованная полоса — расчет

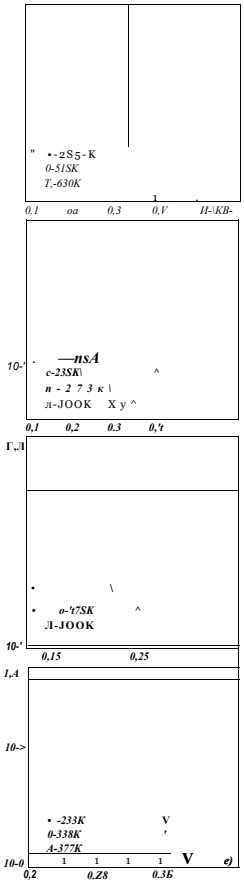


Рис. 25.49. Вольт-амперные характеристики тока ПЭ полупроводников при различных температурах [29]:
о —низкоомный германий n-типа; б — высокоомный германий IP-типа: в —сульфид цинка; г — сульфид

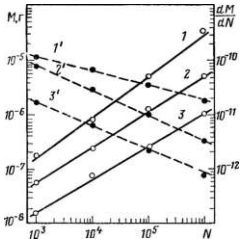


Рис 25.51. Расход массы медных острий *M* при многократных включениях тока взрывной полевой эмиссии [30]:

/V —число включений, ^=30 кВ; расстояние катод-анод 3 мм; угол раствора конуса катода а^-6°; *1.3 — M/N-, 1', 3' — dM/dN.* **Длительности импульсов: 7. Г'-Ь-Ю-» с:** *2.* **2'-2-10-» с;** *3.* **3'-5-10-» с**

25.7. ИОННАЯ И ИОННО-ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Ионная эмиссия — испускание телом ионов химических элементов, входящих в состав тела, при его нагревании (термоионная эмиссия) или при бомбардировке его поверхности другими частицами: электронами (электронно-ионная эмиссия), ионами (вторичная ионная эмиссия) или при облучении фотонами (фотодесорбция). Под действием ионной бомбардировки может возникать также электронная эмиссия (ионно-электронная эмиссия, табл. 25.28 и рис. 25.52). Интенсивную термоионную эмиссию обнаруживают тела с каркасно-полостной структурой кристаллической решетки (цеолиты, алюмосиликаты и другие), в полости которой введены атомы щелочных металлов. Эти атомы слабо связаны с основной решеткой и могут при нагревании легко перемещаться внутри тела, диффундируя к поверхности и испаряясь с нее. На основе таких материалов изготавливаются эффективные твердотельные источники ионов (табл. 25.29 и рис. 25.53, 25.54). При вторичной ионной эмиссии некоторая доля частиц эмитируется в виде нейтральных атомов.

Основные характеристики ионной эмиссии: /г — плотность ионного тока; S — коэффициент распыления — отношение общего числа распыленных частии (нейтральных и ионизованных) к числу первичных ионов; К-^ — коэффициент вторичной ионной эмиссии—отношение числа вторичных ионов с определенным отношением заряда к массе к числу первичных ионов (для неэлементарных мишеней под коэффициентом вторичной ионной эмиссии понимают величину = $= K+/C_i$, где С/— относительная концентрация атомов 1-го сорта в мишени); р+=А:+/S — коэффициент ионизации (табл. 25.30—25.32). Вторичная ионная эмиссия широко используется в масс-спектроскопии вторичны:» ионов для анализа состава приповерхностных слоев твердых тел (34],

Таблица 25.28. Коэффициенты ионно-электронной эмиссии металлов тг, электрон/ион [35] (данные получены графической интерполяцией между экспериментально измеренными значениями)

Мишень	Первичный ион	Энергия первичных ионов. кэВ									
		2	3	4	7	10	15	20	30	40	50
	н+	0,475	0,560	0,650	0,830	0,965	1,12	1,23	1,36	1,46	1,55
Li	**%**	0,260	0,320	0,365	0,465	0,550	0,680	0,775	0,945	1,07	1,16
	W	0,465	0,525	0,590	0,740	0,880	1,10	1,27	1,54	1,77	1,95
	*и^**	0,225	0,310	0,380	0,560	0,700	0,875	1,01	1,23	1,34	1,38
AI	Не^	0,087	0,132	0,156	0,230	0,310	0,450	0,555	0,745	0,885	0,955
	Н+	0,280	0,330	0,380	0,510	0,620	0,765	0,885	1,10	1,31	–
Cr		0,280	0,360	0,430	0,580	0,710	0,880	1,04	1,26	1,36	1,42
		0,240	0^270	0,305	0,375	0,450	0,540	0,635	0,810	0,940	1,01
		0,310	0,420	0,485	0,650	0,780	0,960	1,10	1,42	1,69	1,94
Си	**н+**		0,420	0,480	0,650	0,780	0,960	1,08	1,29	1,45	1,57
		0,162	0,210	0,265	0,380	0,470	0,580	0,670	0,830	0,960	1,08
	К		0,390	0,455	0,620	0,800	1,04	1,18	1,44	1,70	–
	н+		0,650	0,810	1,15	1,42	1,70	1,89	2,17	2,33	–
Ag		0,225	0,295	0,375	0,610	0,800	1,03	1,20	1,50	1,67	1,78
	Не+	0,360	0,450	0,570	0,910	1,21	1,65	2,00	2,50	2,89	–
	Н+	0,360	0,540	0,680	0,980	1,22	1,46	1,64	1,77	2,03	2,15
Ли	Н2+	0,138	0,240	0,325	0,550	0,720	0,930	1,09	1,38	1,59	1,70
	Не+	0,315	0,410	0,510	0,810	1,09	1,52	1,83	2,34	2,68	

Мишень	Первичный ион	Энергия первичных ионов, кэВ							
		50	75	100	125	150	175	200	225
W	Н+	1,54	1,62	1,64		1,64	1,61	1,56	1,53 [36]

Таблица 25.29. Термоионные свойства цеолитов и алюмосиликатов щелочных металлов [33]

Материал	T.	Эмитируе-	Плотность ионного тока, МАСМ2
Цеолит	1100	Cs+	12
Алюмосиликат Li (иГО-м^Оз-гзЮз)	1100	Li+	0,6
Алюмосиликат Rb (Rb20.Al203.2Sio2)	1160	Rb+	0,4
Алюмосиликат Rb + + Mo (10%)	1160	Rb+	2 - 5
Алюмосиликат Na (Na,0-AU03-2SiO,)	1200	Кач-	2
Алюмосиликат Na + + W (10%)	1200	Na+	20

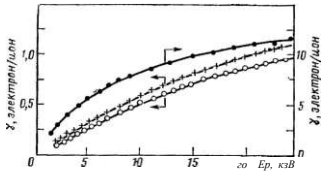


Рис. 25.52. Зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии V при бомбардировке мишеней ионами аргона •"1Аг+ от энергии первячных Ер [23]: **крестики — поликристаллический молибден; светлые кружки — поверхности (111) монокристалла германия; темные кружки — монокристалл хлористого натрия. Измерения проведены при давлении Р^1О-" Па. Поверхности мишеней подвергнуты ионному травлению в вакууме (р^1О-' Па) при Г-350°С (Ge и NaCl), молибденовая мишень предварительно отожжена при таком же давлении при Г-1700 К**

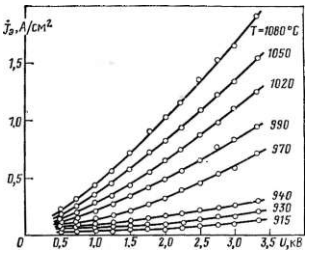


Рис. 25.53. Вольт-амперные характеристики источника ионов цезия из алюмосиликата цезия (Cs2-Al203-2Si02) в импульсном режиме при разлячных температурах катода [32]. Расстояние катод—анод 2 мм, длительность импульсов тока 10 МКС, частота повторения 25 с"'

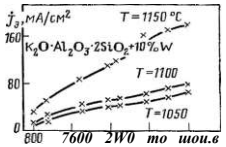


Рис. 25.54. Вольт-амперные характеристики источника ионов К+ на основе алюмосиликата калия с присадкой вольфрама (КгО-АЬОз-гЗЮа+ЮЪШ) в импульсном режиме при разных температурах источника [33]. Значения ионного тока усреднены по импульсу. Длительность импульсов 700 МКС, частота повторения 10 с^'

Таблица 25.30. Основные параметры вторичной ионной эмиссии пленок чистых металлов [34]

Первичный ион	Параметр	Металл							
		Al	Ti	Мп	№	Си	Sn	Та	Аи
кг'	10"^ ион/атом	ПО	92	22	6,4	1,9	0,66	6,9	0,056
	S, атом/ион	3,7	2,3	3,5	6,1	8,5	8,3	2,9	12
	К'^, 10"^ ион/ион	410	212	77	39	16	565	20	0,71
Uc*	10"^ ион/атом	=	337	26,8	9,8	4,73	4,15	50	0,185
	S, атом/ион		0,8	1,1	1,5	1,9	2,8	0,68	3,2
	К*, 10-^ ион/нон		270	29,8	14,7	9	11,6	34	0,59
0 /	10"^ ион/атом	9600	5900	265	63,5	14	9,3	250	0,32
	S, атом/ион	1,6	1,1	2,3	3,3	4,3	5,1	1,1	6,5
	К-", 10-^ ион/нон	15300	5900	610	210	60	47,5	275	2,08

Таблица 25.31. Относительные коэффициенты вторичной ионной эмиссии наиболее распространенных металлов при бомбардировке ионами Ar^, He+ и 0+ (энергия первичных ионов 8 кэВ, за эталон принято железо при бомбардировке ионами Ar+ [34], элементы расположены по латинскому алфавиту)

Продолжение табл. 26.1 Продолжение табл. 26.1

Элемент	Первичный ион			Элемент	Первичный ион		
	Ar+	He».	0+		Ar+	He+	0+
Ag	0,108	0,07	0,135	Dy	1,88	2,84	23,1
Al	9,62	62,2	447	Er	4^50	2,03	15,8
Au	0,012	0,025	0,051	Fe	1,00	0,872	15,8
Be	2,19	15,5	163	Gd	2,28	1,47	13,2
Bi	0,358	0,13	0,464	Hf	2,25	1,33	8,58
Cd	0,019	0,016	0,106	Ho	2,88	3,03	21,4
Ce	0,40	0,773	14,7	In	1,50	30	53.8
Co	1,22	0,37	5,97	Y	2,87	8,4	51,2
Cr	1,01	2,95	41,6	Yb	1,05	2,8	25,2
Cu	0,262	0,235	1.26	La	0,49	0,725	12,8

Элемент	Первичный ион			Элемент	Первичный ион		
	Ar+	He+	0+		Ar+	He+	0+
Lu	15,6	2,64	16,6	Sm	0,275	1,84	19,5
Mg	11,4	13,3	86	Sn	0,094	0,202	0,558
Mn	2,15	0,95	13,5	Ta	0,186	0,853	5,43
Mo	0,385	1,86	25,2	Tb	7,00	3,63	23,8
Nb	1,16	4,05	35,6	Ti	1,56	7.14	127
Nd	4,13	1,11	17,8	Tu	1,68	6,7	22,1
Ni	0,98	0,415	**4,42**	V	2,75	13,1	200
Pb	0,086	1,08	**1,22**	W	0,187	0,447	
Pd	0,042	0,033	1,55	Zn	0,034	0,107	0^918
Pt	0,112	0,013	0,076	Zr	0,296	2,08	28,2
Pr	1,03	2,61	22,2				
Re	0,65	2,14	**20,5**				
Rh	0,89	0,556	**24**				
Ru	0,76	0,724	20,6				
Sc	7,75	31	205				

Таблица 25.32. Основные параметры вторичной ионной эмиссии карбидов [34] (бомбардировка первичными ионами Ar^ с энергией 8 кэВ, плотность потока первичных ионов 10-^ А/см^)

Параметр	TiC	v c	CrC,	ZrC	NbC	MoC	HfC	TaC	WC
S	3,0	2,9	3,3	2,3	2,9	2,9	4,0	2,8	2,5
TfMe	21,0	24	14	*2,7*	6,7	1,9	1,3	0,82	0,52
•fc	0,056	0,034	0,033	0,047	0,054	0,030	0,056	0,030	0,080
	0.20	0,24	0,12	0,033	0,067	0,018	0,009	0,008	0,006
P c	0,007	0,005	0,004	0,008	0,007	0,004	0,005	0,004	0,012

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. М.: **Наука,** 1966.

2. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов: Справочник. — 4-е изд. Киев: Наукова думка,

i Michaelson H. **B./'/J.** Appl. Phys. 1977. Vol. 48, No 11. P. 4729—4733

4. Электрические и эмиссионные свойства сплавов/Е. М. Савинцкий, И. В. Буров, С. В. Пирогова, Л. Н. Литвак. М.: Наука, 1978.

. 5. Haas G. A., Shin A., Marrian C. R. K.//Appl. Surface Sci. 1983. Vol. 16, No 1—2. P. 139—162.

6. Ardenne M. Tabellen zur Angewandten Physik Auflagi. Berlin: VEB Verlag der Wissenschaften, 1962. Bd. I.

7 **Термоэлектронные** катоды/Г. А. Кудинцева, А. И. Мельников, А. В. Морозов. Б. П. Никонов. М.: Энергия, 1966.

8. **Futamoto M., Nakazawa M., Usami K. e- a.**// J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, No 7. P. 3869—3876.

9. Houston J. M., Webster H. F.//Advances in Electronics and Electron Phys. 1962. Vol. 17. P. 125—206.

10. Lipeles R. A., **Кап** H. **K.** A.//Appl. Surface Sci. 1983. Vol. 10. No 1—2. P. 189—206.

II. Кульварская Б. С.//Радиотехника и электроника. 1970. Т. 15, № 8. С. 1717—1720.

12. Никонов Б. П. Оксидный катод. М.: Энергия, 1979.

13 Soukup R. J./7J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, No 3. P. 1098—1100

14 Ашкинази Л. А., Соболева И. А./'/Итоги науки и техники. Сер Электроника. 1983. Т. 15. С. 154—216.

15. Соболева Н. А., **Меламид** А. Е. Фотоэлектронные приборы. М.: Высшая школа, 1974.

16. **Соммер** А. Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М.: Энергия, 1973.

17. **Белл** Р. Л. Эмиттеры с отрицательным электронным сродством: Пер. с англ. М.: Энергия, 1978.

18. Escher J. S.//Semicondiictors and Semimetals. 1981. Vol. 15. P. 195—300.

19. Escher J. S., Bell R. L., Gregory P. E. e. a.// IEEE Trans. Electron Devices. 1980. Vol. ED-27. P. 1244—1259.

20. Fischer D. G., Enstrom R. E., Escher J. E. e. a.// J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43, No 9. P. 3815—3823.

21. Howorth J. R., Folkes J. R., Palmer J. C.// J. Phys. D. Appl. Phys. 1976. Vol. 9, No 5. P. 785-794.

22. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969.

23. **Электронная** и ионная спектроскопия твердых тел/Под ред. Л. Фирменса, Дж. Венника, В Декёйсера: Пер. с англ. М.: Мир, 1981.

24. **Гаванин В.** А., **Кутенин Ю.** Д.//Итоги науки и техники. Сер. Электроника и ее применение. 1980. Т. 12. С. 43—81.

25. MartinelH R. U.//Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 17, No 8. P. 313—314.
26. Martlnelli R. U., Schultz M. L., Gossenberger H. F.//J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43, No 11. P. 4803—4804.
27. Елинсон **М. И.,** Васильев **Г. Ф.** Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматгиз, 1958.
28. **Ненакаливаемые катоды** /Под ред. М. И. Елинсона. М.: Сов. радио, 1974.
29. Фишер Р., Нейман Х. Автоэлектронная эмиссия полупроводников; С дополнительным обзором Г. Н. Фурсея и О. И. Львова. М.: Наука, 1971.
30. Бугаев С. П., Литвинов Е. А., Месяц **Г.** А., Преображенский Д. И./'Успехи физ. наук. 1975. Т. 115, № 1, С. 101—120.
31. Swanson L. W., Crouser L. C.//Phys. Rev 1967 Vol. 163, No 2. P. 622—631.
32. Кульварская Б. С., Кан Х. С., Доценко В. Г.// Тез. докл. V Всесоюзн. симп. по сильноточной электронике. Томск: Ин-т сильноточной электроники СО АН СССР, 1984. Ч, 1.
33. **Кульварская Б.** С.//Итогн науки и техники. Сер. Электроника. 1981. Т. 13. С. 111—149.
34. Черепин В. Т. Ионный зонд. Киев: Наукова думка, 1981.
35. Baragioia **R.** A., Alonso E. A., Oliva Florio A.// Phys. Rev. B. 1979. Vol. 19, No 1. P. 121—129.
36. Ewing **R. I.**//Phys. Rev. 1965. Vol. 139, No 6A. P. 1840—1843.
37. Pholoemission in Solids//Ed. by M. Cardona, L. Ley: Topics in Applied Physics. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 1978.
38. Handbook of Auger electron Spectroscopy/ P. W. Palmberg, G. E. Ria-ch. Weber R. E. Edhia: Phys. Electron. Industry, 1975.
39. Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy/C. D. Wagner, W. M. Riggs, L. E. Davis. Minnesota, USA: Perkin-Elmer Corp., 1979.
40. Hoene E. L.//Aev. Electron. Electron. Phys. 1972. Vol. 33A. P. 369—380.
41. Аршавский А. Н., Голубев Г. П., Кауфман И. Х. и ДР./7ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 8. С. 1580—1587.

Глава 26

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКОВ

В. Ю. Иванов, Л. И. Винокурова

Ниже приведены магнитные характеристики веществ, не обладающих (в отсутствие магнитного поля) атомной магнитной структурой: простых элементов, наиболее известных неорганических соединений, а также некоторых важных для практики соединений (силициды, селениды, теллуриды и др.).

В слабых магнитных полях (цбЯ<л:Г, где Цв — магнетон Бора, И — напряженность магнитного поля, *к* — постоянная Больцмана, *Т* — температура) намагниченность *J* таких веществ возрастает прямо пропорционально напряженности поля: J=XvH, где Xv — магнитная восприимчивость единицы объема.

Вещества с отрицательной магнитной восприимчивостью называют диамагнитными (Xv<0). Причиной диамагнетизма является электромагнитная индукция молекулярных токов, вызываемая в электронных оболочках атомов внешним магнитным полем. Явление диамагнетизма присуще всем веществам без исключения.

Парамагнетизм (Xi'>0) характерен для веществ, частицы которых (атомы, молекулы, ионы, атомные ядра) обладают собственными магнитными моментами, но в отсутствие внешнего магнитного поля эти моменты ориентированы хаотически, так что в целом *1=0.* Во внешнем поле магнитные моменты атомов парамагнитных веществ ориентируются преимущественно по полю. Если поле очень велико (ЦвН:^кТ), то все магнитные моменты парамагнитных частиц ориентированы строго по ПОЛЮ (магнитное насыщение).

С повышением температуры вследствие дезориентирующего действия теплоного движения частиц магнитная восприимчивость убывает — в простейшем случае по закону Кюри: $\chi_v = C/T$, где С — постоянная Кюри, С== — — — . Здесь рэф — эффективный магнитный момент на молекулу; ***N*** — число молекул в единице объема. L

Для веществ, в которых носители магнитного момента взаимодействуют между собой и с внутрикристаллическим полем, температурная зависимость магнитной восприимчивости парамагнетиков следует закону Кюри — Вейсса: Xv—С Ι(Τ — 6), где постоянная С во многих случаях практически совпадает с постоянной ***С*** в законе Кюри для свободных магнитных ионов данного вида; постоянная 6 характеризует взаимодействие магнитных ионов между собой и с внутрикристаллическим полем. Закон Кюри — Вейсса выполняется обычно в определенной области температур. При низких температурах (ниже Гэ=70 К) наблюдаются отклонения от него, вызванные влиянием неоднородных электрических полей соседних ионов или ориентированных диполей молекул растворителя на орбитальный момент электронов. Закон Кюри — Вейсса выполняется также для ферро- и антиферромагнетиков в некотором интервале температур выше температуры магнитного упорядочения.

Парамагнитными могут быть и химические соединения с ионами, не обладающими магнитным моментом в основном состоянии. В этих соединениях парамагнетизм связан с квантовомеханическнми поправками, обусловленными примесью возбужденных состояний с магнитным моментом. Такой парамагнетизм (поляризационный или парамагнетизм Ван Флека) не зависит от температуры.

В металлах вклад в парамагнитную восприимчивость, обусловленный спиновым парамагнетизмом

электронов проводимости (парамагнетизм Паули), почти не зависит от температуры.

Парамагнитная восприимчивость полупроводников, обусловленная примесными носителями, в простейшем случае зависит от температуры $\chi \sim \exp(-\Delta e/(2kT))$, где A — константа вещества; Δe — $u' \cdot m\Phi.ча$ запрещенной зоны полупроводника.

Для характеристики магнитных свойств веществ обычно используют удельную магнитную восприимчивость (т. е. магнитную восприимчивость на единицу массы); $\chi = \chi_v/\rho$, где ρ — плотность вещества. Часто магнитную восприимчивость относят к одному молю вещества (х.-н). Между величинами χ и $\chi_т$ существует следующее соотношение: здесь М — относительная молекулярная масса.

В табл. 26.1 приведены значения удельной магнитной восприимчивости диа-и парамагнитных веществ, для которых температурная зависимость восприимчивости не описывается законЮм Кюри _ Вейсса.

В табл. 26.2 приведены значения восприимчивости в основном при комнатной температуре некоторых парамагнетиков, температурная зависимость восприимчивости которых удовлетворяет закону Кюри — Вейсса. Сделана попытка ограничиться лишь теми веществами, в которых не обнаружено магнитное упорядочение при низких температурах (по крайней мере выше 4,2 К).

Значения χ в таблицах даны в СИ ($м^3/кг$). Для пересчета в СГСМ ($см^3/г$) нужно значение χ, выраженное в СП, умножить на 10^{-3}.

В таблицах при отсутствии дополнительных обозначений приведены данные для твердого поликристаллического состояния. В других случаях приняты сокращения: (м/к) — монокристаллическое состояние (в случае, когда .1.Ч вещества приведены данные для монокристаллического и поликристаллического состояний, во избежание ошибок специально выделено значение поликристаллического состояния — (п/'к); $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ —восприимчивости, измеренные вдоль и перпендикулярно оси наиболее высокой симметрии; $\chi_{\parallel}$, χ_b, χ_c — восприимчивости вдоль направлений векторов трансляций элементарной ячейки данной кристаллической решетки; (г) — газообразное, (ж) — жидкое, (та) — твердое состояние; (р) — раствор; p — концентрация дырок в полупроводнике; n — концентрация электронов в полупроводнике; $T_{пл}$ — температура плавления; $T_{исп}$ — температура испарения; ΔT — интервал температур, в котором температурная зависимость χ следует закону Кюри — Вейсса, прочерк в таблицах означает, что значение температуры измерения п сригинальной работе не приведено.

Детальные сведения о явлениях диамагнетизма и парамагнетизма веществ можно найти в следующих монографиях: Я. Г. Дорфман «Магнитные свойства и строение веществ», М., 1955; Ч. Киттель «Введение в физику твердого тела», пер. с англ., М., 1978; С. В. Вонсорский «Магнетизм», М., 1971. Некоторые физические свойства элементов, в том числе и кристаллические структуры, приведены в монографии В. И. Чечерникова «Магнитные измерения», Изд-во МГУ, 1969.

Таблица 26. I. Значения магнитной восприимчивости диа-и парамагнитных веществ

Вещество	Т, К	χ, 10^{-9} м³/кг
и»		-1,974
На	293	-1,9867
Нг	90	-1,97
н.	^20	-2,7 (ж)
HjAsOs	293	—0,406 (ТВ)
НзВО,	298	-0,55
HBr	273	-0,407 (ж)
HCl	273	-0,62 (ж)
HF	287	-0,43 (ж)
Hl	281	-0,373 (ж)
HI	195	—0,370
НЮз	298	-0,27
HIO4	298	-0,294
HNO3	298	—0,316
Н.,о*1	273	-0,7019 (ТВ)
и;о*1	273	-0,7177 (ж)
HrO*1	293	-0,7199 (ж)
HrO*!	373	-0,72454 (ж)
HrO*!	>373	-0,727 (г)
H2O2	298	-0,015
H3PO3	298	-0,518 (р)
H3PO4	298	-0,447 (р)
H_2S	298	-0,748
	298	-0,406
Й1?6з	298	-0.352 (ТВ)
H^SeOi	298	-0,353
HrTeO3	288	-0,24
H,Teo4	291	-0,43
Eh	—	-0,994 (г)
оно		-1,325 (г)
DjO	302	—0,682 (ж)
DjO	276,8	—0,626 (ТВ)
DjO	276,8	-0,632 (ж)
D,o	293	-0,637 (ж)
He	298	-0,47
	298	2,04
Lj*2	298	3.35
LiBr	298	—0,400
	298	
L1 (C2H3O.,)	298	-0;513
	298	-0,365
tig"'	298	-0,573
LiClOg	298	-0,319 (р)
LiF	298	-0,389
LiH	298	-0,79
Lil	298	—0,37
LilO,	298	-0,26
LiNOs	292	-0,48
LiNOs-SHaO	298	-0,504
LhO	293	-0,57
LiOH	298	-0,516
Li,So4	298	-0,364
Li2So4-H2o	290	-0,43
Be*' (М/К)	293	-2,38
Be-^ (М/К) $\chi^{\perp}$	293	-0,80
Be (п/к)	103	-0,75
Be	291	-1,0

2.9X

- - - при 343 К .

При уменьшении температуры от 298 К , *78* К χ уцеллчается на 1,3% [9].

См. рис. 26.1.

Продолжение табл. 26.1 *Продолжение табл. 26.1*

Вещество	г, к	., 10"» м^/кг	Литература	Кещество	*Т*, к	Х. 10-» MVkp	Литература
Бе	573	- 1 , 2	112]	NO.,	408	**3,26 (Г)**	
Be	1200	- 1 , 3	112]	N ,0	285	**-0,429 (Ж)**	
Bed,	298	—0,332	11	N2O	289	—0,429 (Г)	
Be(No3)2	298	**-0,308 (р)**	11	N.O3	291	-0,206 (ж)	
Be(KO3ь-3H2o	298	**-0,311**	4	N2O4	257	-0,276 (ТВ)	
BeO"	298	-0,476	[1	N2O4	295.1	-0,250	
Be(OHЬ	290	—0,537	11	N.O5	289	-0,332 (ТВ)	
BeSo4	298	—0,354	m	P-o,	33	118 (ТВ)	
BeSo4-4H2o	290	- 0 , 51			54,3	319 (ТВ)	
Bi2	90	- 0 , 63	a	i f ^	54,3	310 (ж)	
B"2	293	- 0 , 62	1; 13]	O2	70,8	271,4 (Ж)	
	373	- 0 , 73	1'l	0 ,	90,1	240,6 (ж)	
	503	—0,76	[1'l	0 ,	293	107,8 (г)	
	1373	- 0 , 71	[1-1	O3	90	0,14« (ж)	r,
O-B (ромбоэдрический)	300	- 0 , 795	[15]	O3 Ne	90 293	0,14 (г) —0,33 (г)	26]
	300	—0,78 (0,10)	1161	Na*"	78	0,582	1
(ромбоэдрический)	300	- 0 , 3	Г151	Na*2 Na*2	298 303	0,610 0,600	9
	300	—0,645	[K5]	Na*2	523	0,620	26]
BCl3	298	- 0 , 511 (ж)	m l	Na,B40,	298	-0,422	1
B,O3	298	- 0 , 56	11]l	Na^B^O^-lOH^O	293	—0,593	2 7]
C (алмаз)	103	- 0 , 49	12]	NaBr	298	-0,40	12
C (алмаз)	293	- 0 , 49	l]l	NaBr.2H2o	291	-0,420 (р)	4
C (алмаз)	300	- 0 , 98		IaBrO3	298	-0,293	lli
C (алмаз)	473	- 0 , 50	1'1	NaC^HgOa	298	**—0,458**	11
C (алмаз)	673	- 0 , 51	1'l	KaCrH3O7-3HrO	282	**-0,483**	4
C (алмаз)	1173	- 0 , 54	1'l	**Na.CO3**	298	**-0,39**	111
C (алмаз)	1473	—0,56	11'l	**N2C03-10H,o**	290	**—0,58**	17'l
C (графит) (п/к)	14	- 4 , 7	[18]	NaCl	123	—0,501 (ТВ)	2i3]
C (графит) (п/к)	289	- 3 , 0	[18]	NaCl	298	—0,518 (ТВ)	1
C (м/к), x7	293	- 2 1	[191	NaCl	635	-0,499	
C(м/к), y-	293	- 0 , 4		NaClO,	1206 298	-0,508 —0,326	111
CCl4	291	—0,442	[4]l	Na^Cr^O,	298	-0,21	f l j
с н '	293	—0,4936	12(3]	NaF	298	-0,383 (ТВ)	
с к.	298	-0,432 (ж)	[2;1]	NaHC03	293	-0,21	
CNCl	298	- 0 , 527	11	NaHPO,	293	—0,457	[30]
CO,	298	—0,454	11	NaHPo4	293	-0,399	130]
CO	298	—0,35	11	NaHPOi-HaO	296	—0,438 (ТВ)	14]
COS	298	- 0 , 539		NaH.,POj	293	-0,381	[3(3
COCl2	298	- 0 , 485	1	Nal	298	-0,380	[11
CS„	293	- 0 , 554 (ж)	2]	Nab2HoO	300	-0,405 (р)	14;1
к.	88	- 0 , 507	23]	NalO,	298	-0,268	i i j l
N:	293	- 0 , 427	1	NaNOa	298	**—0,210**	1
NH,	298	- 1 , 06 (г)	1	NaNOs	298	**-0,301**	l
NHjBr	298	- 0 , 484 (ТВ)	1	Na.,o	298	- 0 , 319	l
	298	- 0 , 533	11	Na;02	298	- 0 , 36	11
	298	- 0 , 545	1	NaOH	290	- 0 , 59	17
	298	- 0 , 686 (ТВ)	1	NaPOs	298	- 0 , 417	11
ш / а			1	Na^S	298	- 0 , 50	m
KHдClO3	298	—0;415	1	Na^S.,	298	- 0 , 48	i i j
NH4F	298	—0,62 (ТВ)	1	Na^Sg	298	—0,48	m
NHjI	298	- 0 , 455 (ТВ)	11	No,84	298	- 0 , 48	m
K H J o 3	298	- 0 , 323	11		298	—0,48	
NiX'O,	298	- 0 , 421 (ТВ)	ni	Na^SOa	298	—0,48	1
№.oH	298	- 0 , 90	11	Na2So4-10H2o	298	- 0 , 37	lJ
(NH4)-S04	298	- 0 , 51	14	Na2S0v7H20	298	- 0 , 571	1
	294	—0,440	1	NasSsOs	293	- 0 , 462	[3C
	298	- 0 , 632	1l	Na..S203-3H2o	298	- 0 , 246	m
ко	63-90	0,66 (ТВ)	m	Na.2S204	290	- 0 , 368 (ТВ)	[4]
NO	117,64	3,81 (ж)	m	Na.Se	298	- 0 , 200	tic
KO	146,9	77,45 (г)	m		298	—0,48	13! 1
NO	298	48,7 (г)					

OI температуры. См. рис. 2G.2. При Г < 90 К значение х зависит от *Т* [1] і См. рис. аб.4, 26,о.

fsif'

Вещество	*Т.* к	X, 10-9, „3/кг	Литература
NaaSe^	298	-0,392	3n
NasTe	298	-0,432	3.1
NasTea	298	-0,349	3n
Mg*i (п/к)	1,2	0,25	
Mg« (п/к)	293	0,46	[3]3
Mg (м/к),	293	0,46	[3]3
Mg *(ы/к),* **Xj^**	293	0,46	[33]
MgBr^	298	-0,39	(1
M g ^ H A V - H ^ o	298	-0,541	[1
	298	-0,384	n
MgCOs-SHjO	293	-0,525	1
MgCla	298	-0,498	1
Mgcu-eH^o	291	-0,57	7
MgFa	298	-0,364	1
Mgl	298	-0,399	1
Mg(N03)2.6H20	291	-0,287 (р)	4
Mg02	290	-0,25	1
Mg(OH)2	288	-0,378	1
MgS04	298	-0,415	1
MgSOi-HaO	298	-0,441	1
MgS04.5H20	298	-0,518	
MgS04-7H20	298	-0,551	
Mg3(ro4)2-4H20	298	-0,499	1
Al*2	298	0,61	1
Al*2		0,44 (ж)	1
A1Bгз	292	-0,32	7
AlCl3	292	-0,60	7
AlFa	302	-0,16	[1
	298	-0,36	[1]
A^Oз-rHaO	293	-0,337	[34]
Al2(S04)3	298	-0,27	[J]
	300	−0,228	[17]
SiBr^	298	-0,370	1]l
SiC	300	-0,265	3;5]
5.C14	298	-0,520	1
SiOa	293	−0,493	1
Si(OH)4	293	-0,443	1
SiO(OH)2	293	-0,427	3[3]
Si40(0H)e	293	−0,429	3[3]
P (черный)	293	-0,86	[1
P (белый)	103	-0,90	2]l
P (белый)	317	-0,90	2]l
P (красный)	293	−0,67	14]
P	318	−0,90 (ж)	141
P	393	−0,90 (ж)	[14]
PCI3	292	-0,463	1
PCI5	298	−0,490	J
P2O5	291	−0,46	7
POCI3	286	−0,449	4
a-S	293	-0,487	1
(^ромбическая)			
	293	-0,464	[1]
(моноклинная)			
	293	0,259-Ь0,374	
S		−0,480 (ж)	i f f'
S	828	22 (г)	[1]l

Вещество	*т.* к	X, 10-' м»/кг	Литература
S	1023	14,5 (г)	
S (M/K). xa	298	-0,500	[3S
S (M/K). Xй	298	−0,478	(38]
	298	-0,474	3^
	298	−0,554 (ж)	K)]
SCI2	298	-0,480	
SCI3	298	−0,357	1'
	298	-0,365	1
I S "	293	-0,301	l
SHs	298	−0,748	101
S1	298	-0,332	M
SI2	298	-0,184	K)]
	298	-0,553	)()]
S0»	*298*	-0,284	1]
	298	-0,378	K)
		-0,402	K)
	298	-0,539	H
Cl	213	-0,57 (ж)	20
CI	298	-0,57	[1]
	298	−0,287	[11
	195	-0,647	[101
CIH	273	-0,620 (ж)	[И)1
Ат	90	-0,49	2
Ar	293	-0,49	1
K*i	293	0,532	1
	303	0,460	2[3]
	523	0,467 (ж)	2[3]
KBr	298	-0,413	[1]
KBrOз	298	-0,315	[1],
KC,HA	298	−0,458	[!
	298	−0,568	[1
KCNO	293	-0,465	3 '1
K2CO3	298	-0,427	1]
KC!	298	-0,523	1
KCЮз	298	−0,349	1
KCIO4	298	-0,342	
K2CrO4	298	-0,020	I f
K2Cr2O,	293	-0,100	1
KF	*298*	-0,406	[1
	298	-0,353	
	293	-0,428	>I
KH2PO4	290	-0,435	4
KHSO4	298	−0,36	1
KI	298	-0,384	1
KIo3	298	-0,295	1
KIo4	295	-0,292	4
KMПo4	298	-0,127	1
KN03	293	-0,333	\
KN02	298	-0,274	
K0H	298,5	-0,390	
KaS	298	-0,54	1
K2S2	298	−0,50	1
K2S3	298	-0,46	1
KS4	298	−0,43	[1]
K2S5	298	−0,41	[1]
KSCN	*298*	-0,49	1
K2SO3	*298*	-0,404	1
K2SO4	*289*	-0,385	1
K2S2O3	299	−0,393	4
KlSH	295	−0,389	4
KsSiOe	293	−0,412	3 '1

См. рис. 26.4, 26.5; при уменьшении температуры от 298 К ДО 78 К X уменьшается на 0.2% [26].

ки вещества

Продолжение табл. 26.1

K^SA		
K^S^Os		-0,371
KjSiOs	299	-0,383 (р)
Ca^i (п/к)	291	
Ca^2 (м/к)	293	i!05
CaBrr	298	-0,369
CaBr^-3H^O	298	—0,453
Ca(BrO3)2	298	—0,287
Ca(C2H3Oo)2	283	-0,446
CaCO3	298	-0,382
CaCl2	290	-0,49
CaCljj-eHaO	288	-0,462
CaF,	293	—0,360
Cab	298	—0,371
Ca(IO3)2	298	-0,260
Oi(No3)2	298	-0,239 (р)
Ca(No3)2-4H2O		-0,194
OlO		—0,27
CaOs	298	-0,330
Ca(0H)2	298	-0,297
OiSo4	293	-0,364
CaSo4-(l/2)H2o	298	-0,384
CaSo4.H2o	293	—0,384
Ca3Oл-rHrO	298	-0,43
	90	**8,2**
Sc^3	292	7,0
	293	6,45 (0,05)
	293	-0,25
Scb	293	6,38
ScHfl.,6	293	**6,20**
ScHo,36	293	3,61
	293	**—0,018**
	293	-0,33
Ti*^ (П/К)	90	3,13
Ti*' (п/к)	293	3,19
Ti*^ (п/к)	293	3,36
Ti (m/K), X	298	3,35
Ti (M/K), I	573	
Ti (M/K), X	298	
	573	3,07
Ti (M/K), X,	293	3,38
TiC«	293	0,6
TiCl4	288	-0,213
Til/	293	5,93
TiN«	79	1,00
XiO*6	293	1,38
TiOa	293	0,08
	248	8,1
		1,38
TiP	297	0,25
TiS	298	5,40
	293	0,91
	296	0,408
	90-573	-0,09
; i	293	0,20
TiSia	293	1,2
Ti5Si3	293	2,54

• См. рис. 26.6. «г X изотропна.
• **См. рис. 26.8.**
' **См. рис.** -

Продолжение табл. 26.1

Еелiество	*Т, к*	X. 10-» Ы=/Кг	Литература
V*'	293	5,30	57
VCiiNO	298	5,0	58
VXItNO	298,5	10,504	59
V3C1s(NO)b	298,5	10,998	59
	293	1,1	60
ж	293	-0,069	[6!
VP	297	0,032	52
	293	4,4	62
V®3	293	3,0	63
VSi2	293	1,50	561
VSi2	293	1,32	64 1
Cr(CO)e	298	0,050	***n***
	298	-0,724	
	293	0,40	
CFo2C1	220,4	-0,094	66'
CrOjCl	249,3	—0,040	66
CrO.,Cl	296,2	0,017	66'
CrP	298	3,80	67
CF3P	4,2	4,0	[68
CrgSi	293	2,1	70
Cr3s1	293	2,3	
CrsSi3	293	3,0	69
Cr5Si3	293	3,06	63
CrSi	293	5,1	
	293	—0,38ч—0,94	71
Mn„Si2„_„	293	-0,4	[72
FeAsa	90-670	2,1834	73
	100-300	0,74	/4
	115-300	-0,138	74
Fe(CN),H4	298	—0,329	И]
Fe(CO)4	298	-0,019	
Fe(CO)^	298	—0,480	1
FeK	295	0,084	[75
Fesf	293	7,9	176
CoP	298	0,6	167
CooP	298	3,54	[67
CoPS	298	0,17	[77
CoPSe	298	0,089	/77
Co3S4	293	3,4	[78]
CosSi	293	6,4	79
CoSi	293	—0,3	76
CoSi	293	-0,44	80
CoSia	293	0,4	76
NiAs	298	0,322	П
	90-373	0,2309	73
	4,2	8,8	68
NigSa	293	4,3	811
NisSi	293	0,3	79
NiSi	293	-0,3	[76
NiSi	293	-0,08	[71
Ni,.03Sii.93	293	0,19	[82
Cu*^	296	-0,086	[1
Cu«		-0,097 (ж)	!
CuBr		-0,345	1
CuCN	298	—0,267	[1]
CuCl	298	-0,400	
Cul	298	-0,330	**11**
CU2O	298	-0,216	83
CU3P	298	-0,149	[11
CU3P2	291	—0,23	[7]

' **См. рис. 26.10; при *Т* < 770 К** ^ не **зависит г Г [10].**
г **Значение х «е зависит от *Т* [60].**
= **Значение х не зависит от Г [72].**
1 **См. рис. 26.11.**

CuPr	298	−0,28
CuS	293	0,05
CU2S	77-1073	0.30
	?oo	0,15
SsCN	298	-0,398
CUSE	293	−0,!4
Cu^Se	77-1073	0,25
CuSej	298	0.42
CuTe2	298	-0,40
Zn (n/K)	298	-0,175
Zn (п/к)		-0,12 (ж)
Zn*i (M/K), X,.	293	-0,190
	293	−0,145
	300	-0,434
ZN-1 (M/K), XJ_	292	−0,40
		-0,46
		−0,392
		−0,271
Zn(C2H30j)2-2H20	298	−0,477
Zn(CN),	296	−0,370
ZnCOg	299,6	-0,307
ZnCl,		-0,333
ZnFa		-0,565
Zn!i_b		-0,67
Zn(OH)0		-0,465
	300	-0,36
is"-	77	**—O,26**
ZnS		-0,466
ZnsSba	300	-0,34
ZnSo4		-0,351
ZnSo4-H30		−0,497
ZnSo4-7H.,o		-0,365
2П3(Po4)2		-0.35 (ТВ)
Ga@2 (п/к)		-0,31 (ТВ)
(п/к)	290	0,036 (ж)
Ga*2 (N/K)	303	−0,12
Ga (M/K , X«		**-0,^2**
Ga (M/K , XB		-0,23
Ga (M/K , 1!		-0,230
GaAs	300	-0,45
GaCl,	293	-0,46
	298	-0,332
s	293	-0,219
	298	-0,298
	300	—0,210
		-1,715
Ca,S	298	-0,34
CaS	295	**—0,201**
Ca,53	298	**-0,20**
CaSb	293	-0,1102
CaSe	293	-0,10 95
Ge*3	4,2	-0,1059
Ge*3	77,3	-0,34
Ge*a	293	-0,34
	298	−0,30
gSi-		-0,325
		−0,328
		-0,391
GeOa	298	−0,390
GeS	298	0,146
GeS,	298	
As (п/к)		

As (п/к)	181	0,092
As (п/к)	298	0,016
As (п/к)	461	-0,087
p-As аморфный	90	-0,30
p-As аморфный	293	-0,316
7-AS аморфный	293	-0,307
As (м/к) X|, *'•	82	1,005
As {M/K) x^l	292	0,578
As (M/K) "	531	0,273
As (M/K) x ^		-0,238
As (M/K) x ^	292	-0,279
As (M/K) X ,	510	−0,302
	298	-0,337
AsBrg		-0,441
ASCI3	298	-0,312
ASI3	298	**-0,208**
		−0,240
AS2S2		-0,327
		-0,03
		-0,32
(гексагональный)		
	,6-77	0,272
(гексагональный)	293	0,188-0,271
^гексагональный)	900	
Se ^аморфный)	300	-0,304 (ж)
		-0,279
		-0,356
] e	298	-0,414
SeOa	298	-0,264
SeOsHa	298	−0,245
Seo4H2		-0,352
SeOCIa		-0,353
BI2	103	-0,293
Br'	265	-0,40
Br„	266	-0,40
Br^	291	−0,40
		-0,40 (ж)
I ;		-0,353 (ж)
		-0,46 (г)
	298	-0,248
	298	-0,258
Kr	291	-0,38 (ж)
Kr		−0,344 (г)
		0,21
Rb*3		0,198
RbBt	298	−0,341
Rb.COs	298	−0,326
RbCl	298	−0,380
RbF		-0,305
Rbl		-0,340
RbNO,	293	-0,281
Rb.,S	298	-0,394
Rb,S,	298	-0,383
Rb,S3		−П,374

[93
[94,
[94]
[11
[11
f|OI

11
1]

m
[99]

« Оа- ПИС. 26.12.
•=См рис 26.13.
См. рис. 26.14-
ктронов. дырок — с

X от концентраций

ᵈ' См. рис. 26.17.
См. рис. 26.18.
Сы. рис. 26.4; при уменьшении температуры от 2S8 до 78 К значение х увеличивается на 2,5% [9].

Продолжение табл. 26.1

	298	—0,371	[101
	298	—0,368	[10]
	298	—0.363	[10]
	293	-0.331	[1]
	295	1,05	1]
	533	0,73	,031
	298	-0,35	
	298	-0,45	l
		-0,272	l
		-0,385	
		-0,32	
	293	-0,40	
		—0,544	
		-0,287	
	298	—0,025	
	293	-0,296	
	298	-0,328	
	298	-0,247	
	298	-0,270	
•4H„0		-0,374	
		-0,34	
		-0,27	
		-0,33	
		-0,512	
		-0,315	
		2,43	
	292	2,15	
	293	0,197	
		0,365	
		1,305	
	293	1.33	
		1,38	[5
		-0,261	[104]
		-0,22	
		-0,302	[104
		-0,194	[104
		-0,191	[104
	293	0,57	
	293	-0,03	105]
	298	-0,179	
		—0,112	
	297	-0,21	-a,
	90-573	-0,19	54]
	292	-0,215	
	14	2.34	
	289	2,28	П]
	293	2,34	
	81	0,62	
	291	0,70	i
	297	0,580	107]
	295	0,05	50]
	295	0,09	[108]
	297	-0,52	[52]
	20,4	1,56	[1]
	63,8	1,13	[1
	298	0,93	[!
	293	0,82	[44]
	290,5	—0,06	[1]
	293	-0,28	[109.1
	293	-0,12	[1]

MoO3	2S9	0,32	
MoO,	293	0,02	
MooC3	298	-0,175	
Mo,.O5	293	0,23	
MoaO,	298	0,101	
MoS2	289	—0,48	
MoS3	289	—0,33	
MoTe,	293	-0,342	
Tc	78	2,9	
Tc	298	2,7	
Tc	402	2,5	
Tco,.2H2o	78	3,4	
TCO.J.2H2O	300	1,2	
TCO2-2H2O	398	1,34	
	298	-0,129	
Tco4(NH4)	78	0,077	
	298	0,050	
	18	0.43	
	293	0,34	
Ru*i	723	0,496	
RUAs2	90-770	-0,1681	
RuO_n	297	1,26	
RuOCle	299	0,74	
RuPa	90—765	—0,2849	
Rh*2	20	0,926	
Rh*2	293	1,03	
Rh*^	723	1,195	
RhClg	298	—0,036	
RhF4	293	2,79	
		0,408	
Rh2(So4)3-6H2o		-0,173	
Rh2(So4)3. HHjO	298	-0,200	
	20	7,32	
Pd*3	288	5,333	
Pd*3	1503	1,7	
PdCla	291.5	-0,214	
PdClo	300	0,255	
	14	-0,19	
	293	-0,181	
	975	-0,1786	
		-0,22 (Ж)	
AgBr	283	-0,318	
	298	-0,362	
	299	—0,322	
		-0,292	
		-0,34	
		—0,179	
	297-350	-0,274	
	298	-0,288	
		-0,34	
AgNOa		-0,273	
AgNOa		-0,269	
		-0,578	
S ?		-0,158	
AgP2		-0,318	
AgPs	298	—0,329	
A?aPo4	298	-0,287	
Ag^S	77—1073	0,32	
^ ^ е с к а я)	298	—0,3726	
	299	—0,292	
AgSo4			

" См. рис. 26–8.
" См. рис. 2...10, 26.19-
См. рис. 21. !0.
•4 *См.* рис. 26.20.

См. рис. 26 21.
См. рис. 26 22.
См. рис. 26 23.
См. рис. 26.24.

продолжение табл. 25.10

AfeSo4		-0,298	
Ag^Se	77-1073	0,35	
Cd« (п/к)	14	-0,310	
Cd« (п/к)	293	-0,176 (ТВ)	
Cd*i (п/к)		-0,160 (ж)	
Cd (м/к), X	14	0,679	
Cd (м/к),	293	-0,243	**[118]**
Cd (м/к),	14	-0,130	[118]
	293	-0,142	[118]
Cd (м/к), Xj^	300	—0,431	
	298	-0,321	f89J
	298	-0,407	**[1]**
CdBr^-ffi^O	298	-0,379	
Cd(C2H302)2	291	—0,365	
	298	—0,328	4
		-0,305	1
CdCO^		-0,271	4
CdCOs		-0,375	l
CdCl,		-0,368	l
CdCl,-H,o		0,451	[4
	298	-0,074	1
	298	-0,270	1]
CdF,	298	-0,320	
	298	-0,235	
S(10)	298	—0,233	l
Cd(No3)2	298	-0,454	l
Cd(No3)2-4H20	298	—0,380	
CdO	300	-0,278	**[120]**
CdO	300-900	**-0,28**	[1]
		-0,338	
		—0,302	
		-0,436	**121]**
CdSOj	298	-0,284	
3CdSo4-8H20	286	**-0,281**	4
CdSb	293	—0,30	**122]**
CdsSb,	300	—0,434	89]
CdSe (M/K), X|,	298	—0,354	123]
CdSe (M/K), XJ^		-0,304	[123]
		-0,415	124
Cd.Pg	300	-0,16	125
In*s (П/К)	293	-0,077	126
In*3 (п/К)	298	-0,56	
In (M/K), X,,	293	-0,158	lir
		-0,078	
In (M/K), X_L	293	-0,2714	[127]
InAs	293	-0,30	128]
InBrs	298	**-0,20**	
InCl	298	-0,30	1
InClg		-0,57	
InClg		-0,40	**Il**
InFj		-0,320	**lik,**
InN*«		—0,191	**[1]**
In^O		-0,076	
	293	-0,313	
InPo.2ASo,8	293	**—0,282**	i l k
In^S	298	—0,19	

•1 См. рис. 25.25.
Восприимчивость решетки.
*» см. рис. 26.26.
Решеточная часть х-
« n = 1.9-10" см-».

Продолжение табл. 25.12

Вещество	*Т, к*	X, 10-» М^/КГ	Литература
InS	« 8	-0,19	[1]
In^Ss	298	-0,30	[1]
InSg	293	-0,19	
InSb*i	293	—0,281	13
InSb*^	293	-0,284	131]
InTe кубическое	293	-0,14	IS
InTe тетрагонное	293	-0,22	ISШ
a-Sn (серое)	273*3	-0,310	130]
a-Sn (серое)	273*4	-0,265	130]
a-Sn (серое)	100	-0,267	1]
P-8n(белое)*в (п/к)	4,2	0,023	94
P-Sn (белое)*5 (п/к)	293	0,026	Г.-94]
P-Sn (м/к), x„	293	0,026	127]
P-Sn (м/к), X,	293	0,029	[127]
Sn		—0,038 (ж)	[1]
5ПВГ4	298	-0,340	11
	293	-0,738	10]
i s ® .	293	-0,144	101
i S f - ''	293	-0,669	k)]
	298	-0,36	1
SnClj	298	—0,441 (ж)	1
$SnCl_n$-2H2o	298	-0,405	1]
Snh	298	0.327	[10]
SnO	298	-0,14	[11
SnO^	298	-0,27	[1]
Sn^Os	289	-0,33	7J
Sn(oH)4	293	-0,321	1]
SnO(OH)2	293	—0,278	
SnSo4	291	-0,29	
SnSe	293	-0,10	
Sb*» **(п/К)**	293	—0,81 (ТВ)	M
Sb*e (п/к)		—0,02 (ж)	[1]
Sb (M/K), X||	90	-1,73	[133]
Sb (M/K), X..	293	—1,42	[133]
Sb (M/K),	90	-0,50	[133]
Sb (M/K), X,	293	-0,50	[133]
SbBrs	298	-0,318	J1]
Sb(CeH,3	298	—0,515	11'
	293	-0,213	
SbCls	298	—0,380	] **6**
SbCls	298	-0,401 (ж)	[1
SbF,	298	-0,256	1
SbIs	298	-0,293	[1
Sb^Os	298	—0,238	[1
SbOCl	298	-0,214	[10]
SbjSg	298	-0,25	1[
sb'ses*'	130-500	-0,383	135
Sb^Tes	130-150	-0,398	[135
SbZn	293	-0,285	[134]
SbZns	293	—0,261	[134
SbZns	*T>T^n*	—0,107 (ж)	[134
Te*8	14,2	—0,293	[136
Te*8	293	-0,283 (0,005)	[37]
Te*8	Г>Г„Л	-0,05 (ж)	[1]

« n =6,2.10» СМ-».
« n=4-10" см-«.
n = 10" см-».
*< Решеточная часть.
« См. рис. 26 27.
•6 См. рис. 26 28.
р-Проводвмсть.
" См. рис. 26.29.

Te" (ы/к),	293	-0,329	
Te«, X		—0,296	
		—0,369	
TeBr,	298	—0,474	
TeCl2	298	—0,273	
TeFe		—0,14	
TeOr	291	**—0,216**	[7
TeOrHr		—0,402	
Te(CH3feCl2		-0,353	**lSl**
Te{CH3)2 *h*	298	—0,313 (ТВ)	10]
	14	-0,35 (ТВ)	136]
		-0,38 (ТВ)	**Ii**
		-0,39 (ж)	14
		—0,33 (ж)	14
	433	6,85 (г)	
Ii (атомарный)	1303	8,82 (г)	**,j**
Ii (атомарный)	1440	—0,354	[137]
U (м/к), Xa	298	-0,331	[137]
(м/к), lb	298	-0,336 (Ж)	,37,
Ic	298	-0,387 (р)	
It!"""-		-0,387	
ICk	298	**-0,262**	1
!Cl3	298	-0,369 (ТВ)	lo
IF5	195	-0,373 (ТВ)	i?
Ш	281	—0,33	1]
Ш	298	0,23	1
Xe	298	0,20 (ж)	1
Cs"2		-0,316	1
CsBr		**-0,288**	1
		—0,318	1
		-0,337 (ТВ)	1
		—0,30	**1**
CsClC^		—0,293	1
CsF		—0,318	**[1**
Csl		—0,270	[10]
CsIOs		—0,279	**}**
CsNOg		-0,349	
C3S		—0,355	
		—0,354	**joi**
	298	-0,353	**[10]**
	298	—0,352	**[1]**
		-0,349	'llsl
		-0,321	**|**
		—0,331	1
CsjSe	298	0,150	**1**
	293	0,316	1
	573	0,415	**'l**
	673	-0,31	
	298	-0,357	
V2H,o	298	—0,269	
		-0,366	
		—0,298	
		—0,35	
BaCls		—0,409	
2HrO		**-0,288**	
	298	-0,291	
		-0,317	
Ba!,.2H,o	298	-0,38	1
Ba(103)2	298	-0.251	1

	298	-0,254
	298	-0,19
BaOr	298	-0,240
Ba(OH)2	298	-0,31
Ba^OH)2-8H^O	298	—0,497
	291	-0,32
BaSo4	298	-0,306
Ba820б-2H20	293	-0,359
La«	293	0,73
La*i	298	0,85
LaBe	298	—0,294
LaCJs		5,6
La(No3)3		—0,072
La,03		-0,24
La^Ss		—0,099
La^Si		-0,246
LaSs		-0,03
Las1_	293	**-0,26**
La,(So4)3	293	—0,30
9HrO	293	—23
	4,2	0,46
	77	0,40
	293	0,39
	293	—0,109
	297	—0,10
	293	0,005
	90-573	**-0,21**
	293	0,85
	2143	0,685
	293	—0,15
	304	0,391
	293	**—0,008**
	293	0,32
	293	—0,095
	293	—0,064
	297	**—0,62**
	293	—0,15
	293	0,29
	297	—0,149
	293	0,03
		0,05
		—0,098
		-0,178
	298	—0,179
	298	-0,134 (ж)
	298	0,264
	293	**0,20**
	298	**—0,068**
	293	0,363
ReOa (ромбический)	77-300	0,25
ReOg (моноклинный)	300	0,44
Re_2O_5	293	**0,2**
ReO_3	298	**0,088**
Re_2O_7	298	-0,033
$ReO_3 \cdot 2H_2O$	295	-0,291
ReS	293	0,2
ReS_2	290,5	—0,50
Re_2S_7	290-373	0,19
Os	298	0,052

при повышении температуры x уменьшается,

постоянна; при Г = 493 К **X ц = Xj_ •**

" При уменьшении температуры от **288** до **78** К знач личивается на 12%.

См. рис. 26.8.
^ **См. рис. 26.9. 2**
См. рис. 26.31.
• **при H** c_v,
= **См** рис. **26.32.**
= **См** рис. **26.32.**

Воцество	*Т.* к	7. Ю-s м^'кг	Л| ура "	Еещество	Г, К	Х, 10-» м'/кг	
Os	698	0.070	10]	HaBrO3	298	-0,239	!101
Os		0,14 (ж)	101	Hg(CH.,)2	293	-0,199	i3f.i
OsAsa	**90-800**	-0,3279	7;	HR(QH5)2	293	-0,158	i3S|
OsCl2	298	0,158	к	**Hg(C4H,),**	293	-0,115	(33i
OsCIs	295,5	3,04	[154]	**Hg(C5H„)2**	293	-0,103	i36]
OSCI4 (ромбический)	300	3,25	[155]1	**H8(CrH3Or).,**	301	-0,317	[11
OsCL (кубический)	300	2,65	{155	H|JCH,o.b	300	-0,276	
Oslg	295	0,557	156		298	—0,265	itl
OsOa	77	0,536	157	HgCl	298	-0,22 (**TB**)	
OSO2	300	0,528	157	HgCI		—0,248 (ж)	[101
OSO4	77	-0,045	157	HgCh	298	-0,302	lU
OSO4	300	-0.048	157	Hg^Cl^	298	—0,253	[4i
OsP„	90-760	-0,3£45	[88]	HgCro4	298	-0,039	[1l
Ir«	293	0,14	26j	Hg2Cro4	298	-0,122	lU
Ir*i	698	0,167	m	HeF	298	-0,241	[II
Ir*l	1423	0,31	14]	HgP.	302	-0,260	[l]
IrBrj	293	-0,2	1!	Hgl	298	-0,253	[i
IrCIs (ромбический)	298	-0,183	1159		298	-0,283	[i
IrCis (моноклинный)	298	0	1159	**HglOs**	298	-0,245	[i
				HgNOs	298	-0,213	[i
IrOs **(M/K),** *xa*	300	0,92 (0,02)	[160]1	Hg(No3),	298	-0,228	[i
IrO, (M/K),	300	0,83 (0,02)	1бо;1	Hg(No3),-2H.,0	298	-0,225	*m*
	20	1,094	115]1	Hgo	298	-0,20	[1[
pt*2	293	0,97	4j/	Hg^o	298	-0,183	m
pt*2	623	0,795	1i3P1	Hg„(OH),	298	-0,23	11
	1493	0,30	141	**HgS**	298	-0,238	1)
PtCI	298	-0,51	K51 I	**Hg(SCN),**	298	-0,305	
Pici,	295	0,188	K32!1	HgSo4	298	-0,263	1
PtCIs	298	-0,221	1]	Hg.So4	298	-0,247	[1
PtCl4	298	-0,276	[1 1	a-Tl (п/к) (гексагональный)	14,2	-0,258	[1 36]
PtCl.,CO	293	-0,289	[11391				
PtCL2CO	293	-0,37	[109]	ot-Tl (п/к) (гексагональныи)	298	-0,249	[1]
P1,o'3	298	—0,086	I1i				
Ptl,	300	0,225	11331	fi-Tl [(п/к) (кубический)	>508	-0.158	[1]
Ptis	300	0,234	163]				
Ptl4	300	0,285	163]	T1	573	-0,131 (ж)	[I]
PtS	195-723	-0,14	164]	a-TP' (к/к), x„	293	-0,420	31
PtS2	90-723	-0,28	164,	a-Ti« **(M/K),** -/_•	293	-0,164	[168]
PtSe	195-723	-0,11	1164				
PtSea	90-723	-0,13	11134	TlBr	298	-0,225	[1]1
PtTe	195-723	—0,12	164	TlBrO,	298	-0,228	[1i1
PtTe^	90-723	—0,05			298	-0,262	i
Au*3	14	-0,132	1i		298	-0,213	1
Au*^'	296	—0,142		TICNS	298	-0,254	1
Au'.^'	975	-0,1417	7i1	TICO3	298	—0,217	1
Au*3		-0,17	1	TICl	298	-0,241	1
AuBr		-0,22	1	TICIO3	298	-0,228	[i:
AuCU	298	-0,37	[1	TiCrOj	298	-0,075	[i
AuCi	298	-0,288	[1	TlF	298	-0,199	
AuFg	298	0,291	1	Til	298	—0,248	1
.Aul	298	—0,28	1	TIIO3	298	-0,229	1
AUPt	298	-0,369	1	TINO2	298	-0,203	1
Hg*^ (п/к)	80	—0,118 (**TB**)	1 i6]1	TjNOs	298	-0,212	[1
Hg*^ (п/к)	293	—0,167 (ж)	[1		298	-0,166	1
Hg*' (П/К)	560,5	-0,1637 (ж)	1 57i1	**Tl3P64**	298	-0,304	[1
(П/к)	r>7'„cn	-0,39 (г)	[1	Ti,S	298	-0,201	[1
Kg (M/K), x^i	80	-0,112	[1 56]	Tl2SO4	298	-0,223	[11
					14,2	-0,132	1109]
Hg **(M/K),**	80	-0,121	11661	Pb *(n/k)*	289	-0,111	[1]
HsBfs	298	-0,261	[111	Pb	330	—0,075 (ж)	111
HgBr	298	-0,204	[111	Pb^'^ **(M/K)**	293	-0,114	If:271
				PbBrr	298	—0,247	[I1

« См. рмс. 26.21.
« См. рис. 26.33.
См. рис. 26.34.
" См. рис. 26.35.

См. рис. 26.6.
См. рис. 26.27; изотропия у Б плоскости (ICOf Огсутст. |130|.

Продолжение табл. 26.1

		−0,274		1
	298	−0,254		l
	298	−0,229		
	298	−0,265		[1
. PbCro4	298	−0,056		[i
PbF,	298	-0,237		[1
		-0,274		"|
PИO		-0,235		1
PЬ(KO3Ь	298	-0,223		Г
PЬO	298	-0,19		Г
PЬO,	293	-0,09		ll
PЬA	291	-0,24		7
PЬ3(Po4).	298	−0,224		[1
PbS (порошок)	293	−0,342		[170]
PbS	293	-0,390		[170]
PbSOj	298	-0,230		[1]
PbSe*i	293	−0,447		[135]
PЬTe	293	-0,446	**(TB)**	[135]
PЬTe	293	−0,051	(ж)	134]
(п/к)	14	-1,55		
(п/к)	298	-1,34		lf"
	T>T,,	-0,0502	(ж)	[1]
Bi *(«lk),*		**-1,20**		[171]
Bi (M/K), XJI		-1,295		[172]
Bi (M/K), X^		− 1,053		[173]
Bi (M/K), XJ^		−1,77		[171]
Bi (M/K),		−2,04		[172]
Bi (**M/K**),		− 1,482		[173]
BiBrg		−0,328		[1]
Bids		-0,084		[1]
		0,201		[1]
Bilj		-0,23		1]
Bi(No3)3		-0,34		1]
B!(Ko3)3-5H2O	298	-0,23		I"
BIO	298	−0,328		l
	298	-0,49		l
Bi(oH)3	298	—0,18		
PiPO^	298	−0,253		
	298	-0,253		
	298	-0,239		[l
Blfs04)3	298	**-0,282**		
BiSSeg	130—600	-0,410		•las,
BITe	293	-0,57		13]
Bijes	130-600	-0,402		,35,
Th	90	**0,66**		
Th	298	0,57		l
Til	130-300	0,410		[174]
ThCl4-8H2o	305,2	−0,348		[1]
Th(No3)4	298	-0,225		[1]
ThOs	83	-0,056		1751
ThO,		—0,061		1]
		1,63		176]
		1,72		176]
a-U*-;	293	1,85		
	623	**2,02**		
	S-1193			]176]

-и при *T* = 933 К.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	*T,* к	Х. ю-» М=/КГ	Литература
	288-1193	2,06	176]
UFe	90	0,01	177
VF,	293	0,12	1771
иОз	293	4,5	[1]
UOS	290,5	10,527	***ищ***
U2S2	293	4,545	1179]
из3е,		3,567	[180]
a-Np	300	2,34	181j
a-Pи*2	293	2,5	[1|
a-Pu«	78-793	2,35*2	1811
r-l-Pu*4	78-793	2,44*2	[182
	78-793	2,36*2	[182
B-Pи*e	78-793	2,31	182
r-Pu	78-793	2,36	182
PuFe	295	0,483	Ij
PuOj	300	2,645	1|
Am	300	4,0	1|
Am	300	2,82	181]

" переходит в -j-U при Г = 1040 К-
См. рис. 2й.38; r-Pи переходит в f-Pu /• =400 К
Приведено среднее значение х Для ука интерва.
»» ?-Pи переходит в i;-Pu при Г =490 К.
" -(-Pи переходит в 6-Pи при *Г* = 590 К.
6-Pи переходит в E-PU при *Т — 740 К.*

Таблица 26.2. Магнитная восприимчивость парамагнетиков, температурная зависимость которых удовлетворяет закону Кюри — Вейсса

Вещество	*Т.* к	*k l*	ДГ. *к*	Р⊃Ф, *V-B*	е, к	Литература
Sc **(TB)**	292	7,0	—	1,8	-950-^ -1000	[lOj
TiBr^	288	3,10	90-300	2,8	—1110	101
TiS,	296	0,408	—	0,52	—	53]
Ti2(So4)3	—	—	14-290	1,41	—	lOj
VBr^	293	15,3		4,30	-400	191]
VBr3	293	9,95		2,72	—20	191]
VCh	293	19,8	14—300	4,15	—565	lOi
VCi4	293,8	5,86		1,62	±1	192
VF3	293	2,53		2,55	—	[193
VI, (красный)	295	14,0	—	3,32	-140	194
	90	26,6	—	2,43		[194]
(красный)	295	13,8	—	3.27	— 140	[194]
(ч.рный)						
VIo (черный)	90	26,3	–	2,42		**[194!**
	295	8,02	—	2,92	—	[19LJ
	90	39,0		3,50	–	|i:.4i
	293	20,3		2,22		
VTe	293	> 0		1,7	0	
CrBr			100-600	2,07	-1550	fipq
CrH	295	!3,63	—	1,77	—247	ff^ci
CrSo4			—	4,80	—	
Cr,(So4)3	293	30,1	90-900	3,84	-16	
MnF4			90-295	3,84	-10	
PeIOH).,	301,4	124,6		5 ''''		i l l
FC;(So4)3	283	30,6	65-300	5 ; r	-65	[lOi

Продолжение табл. 26.1

Вещество	*т, к*	*kl Ai*	*&Г, к*	"эф.	е, К	Литература
			300-900	5,8	−75	10]
	293	2^5		2,3		[201]
CoTe,	293	3,11	90−723	2,81	−540	202]
Nil2	293	12,4	83-603	3,25	-42	10]
NiSa			4−440	3,15	-2100	2031
NiS2			440-900	2,70	− 1000	[203]
NiTe	293	0,844		0,61	—	[204]
Nile		—	90-600	0,99	-1100	[205]
NiTe,	293	0,445	100-400	0,57	—	204]
CuS,	298	0,29	4,2-100	0,58	−25	206]
ZrBrj	300	0,18	—	^0,4	—	207
ZrCh	300	0,925	—	0,6	—	207
ZrCls	300	0,35	—	-0,4	—	207
ZrS,	296	0,535	—	0,61	—	53]
NbFs	293	0,95	—	0,7	-180	
NbO	295	0,29	1,5-150	0,052	—	108
NbO,	295	0,05		0,32	—	209
NbaOs	295	0,09	1,5-150	0,237	0	108
NbS,	293	0,39		0,98	-1100	[146
MoBГ2	293	1,34		0,35	—	[210
MoBГ3	293	1,56		1,24	—	[210]
MoBГ4	293	1,62		1,02-1,28	—	[210]
MoCl3	290	0,21		0!67	—	210
MoCI4	296	9,6	—	2,54	-39	211
a-MoCU	299,6	0,856	—	==0,85	—	212
MoCl5	305	3,80	—	1,52	23	[213]
MoCI5			195-293	-1,6	—	[10]
TCCl4	306	20^	—	3,14	57	[213]
RuFi	—	—	-291	3,04	-74	[214]
RuFs			292	3,60	—	[214]
RuO,	298	1,22		0,62	—	[161
RhF4	293	2,99		1,1	—	[193]
Pd	288	5^333	450-1000	1 62	−228	[10]
Pd		—	>1000	Г,82	-578	[10]
PdFs	293	14,3		2,05	—	[193]
CeB,	293	11,0	620-1030	291	-344	[10]
CeF,	293	ii,1	100-293	2,51	−62	[10]
Ce,S3	292	13,5	—	2,66	−57	[10]
Ce3us	—	—	—	2,8	—	1215]
PF2O3				3,59	-73	[215
NdBe		>0	620−1030	3,82	−455	[10]'
NdFs	293	24,7	153-373	3,75	-56	101
Nd(No3)3	293	15,2	83-373	3,72	-49	**10]**
Nd2(S04)3	293	17,3	83−373		−42	**101**
			300−673	3^47	— 18	10]
Nd^Sea	—	>0	—	3,58	−33	10]
	—	—	—	3,66	-27	215]
Sm,Os	293	5,15	—	1,50	— 150	Ю; 215]
EuBr,	292	86,2	90-292	7,95	0	[10]
EuCl,	292	119	90-292	7,91	0	[10]
EU2O3	298	28,7	180−673	3,62	— 135	[10]
EiJ2(S04)3	293	17,6	293-628	3,62	-100	[101
GdBe			623-1033	7,63	−49	10
GdCs			80-300	7,95	-44	10
GdHj	—	—	80−300	7,83	11	10
Gd2(S04)3	285,5	89,9	83-700	7,92	-0,4	10
GdSns	—	—	—	8,0	−73	215]
Tb2(S04)3	293	129	293-630	9,63	−2,3	[10]
EF2(804)3	293-700	>0	293−700	9,53	-10,8	[10]
Er,8e3		>0	—	9,63	−5	[10]

Продолжение табл. 26.1

т, к		*лт, к*	*Рэф,* н-й	е. к
296,5	133	290-700	7,28	-41,6
			9,43	-25
		623—1033	4,58	—2
293	11,7	290—700	4,83	-82
	>0	90-293	4,75	-63
296	0,005		0,44	
293	3,34		1,4	
293	0,11	—	0,57	-690
293	0,88		0,94	
293	0,43	195—293		0
302,3	1,0		1,19	- 7
293	1,07	90—293	«1,1	13
300,6	1,20		1,02	20
		293	0,17	
305	1,38		2,04	-985
300	1,99	220-300	1,55	-158
293	3,37	90—290	2,32	—265
302	4,01	77-300	2,57	-266
		<150	2,21	-164
2ЭТ	4^5	98-297	2,07	-30
293	0,20		0,49	
		90-300	1,51	-25
293	0,15		0,38	
		294	2,02	
		295,4	2,31	
	—	297	1,50	-66
195	2,65	195	1,19	—
		293	1,98	
		293,6	==2,90	-30
298	0,997	300—700	2,8	-4025
290,3	1,035	290—720	1,61	—1096
		>900	1,81	— 1617
292	1,68		1,1	
294	9,92	290—480	3,29	25
293	6,33	77-570	3,12	-35
300	10,0	300-509	3,03	-29
294	9,69	90-550	3,29	-62
300	11,24	77—500	3,28	-116
293	7,2	200-394	3,31	5
298	0,072	150—300	3,46	-110
	>0	90-590	1,1 —	
301	5,5	200—450	2^4	-100

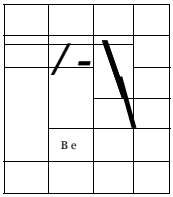


Рис. 26.1. Зависимости •tl|| иХх для Be от температуры [183]

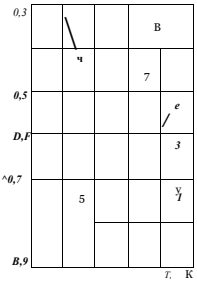


Рис. 26.2. Зависимость удельной магнитной восприимчивости В от температуры по данным разных работ:

! - а - В : 2 - S - Р - В : б, 7 — аморфный В [184]

Рис. 26.3. Зависимость X|—X|| для графита от температуры [19]

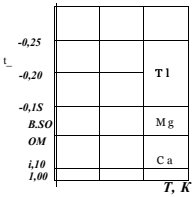
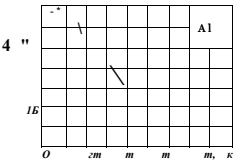


Рис. 26.6. Зависимость х для Ca, Mg. T1 от температуры [33]



/2

Рис. 26.7. Зависимость %m для A1 от температуры [33]

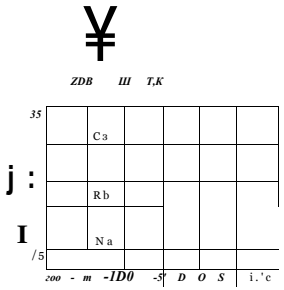


Рис. 26.4. Зависимость Xт для Cs, Rb, Na, K от температуры [185, 186]

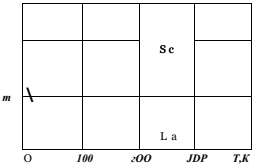


Рис. 26.8. Зависимость х^ для La, Sc, Y от температуры: La [41, 139]; Sc, Y [41, 185]

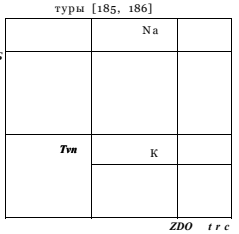


Рис. 26.5. Зависимость X^g'^^gs]® " температуры

x/%zв

—

Hf

Рис. 26.9. Зависимость x/Xro для Ti, Hf от температуры (X20 — восприимчивость при 20°С) [44]

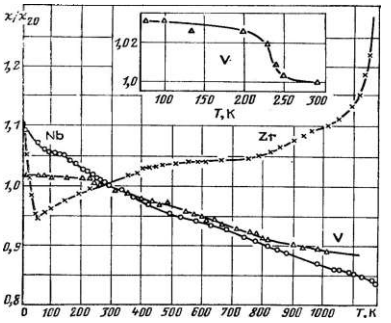


Рис. 26.10. Зависимость х/ЗСю Для V, Zr, Nb от температуры (ЗС2о—восприимчивость при 20°С) [57]. На вставке — аномальная зависимость х/Хго для V при низких температурах

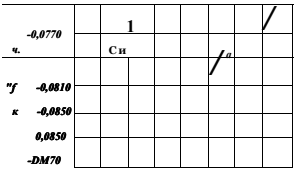


Рис. 26.11. Зависимость % для Си от температуры [117]

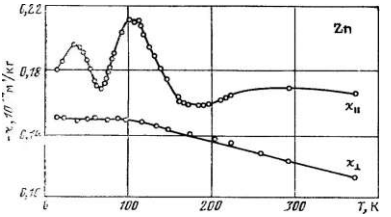


Рис. 26.12. Зввисимогти у ц и Xj^ для Zn от температуры [118, 185] (Я=65.7-10'' А/м)

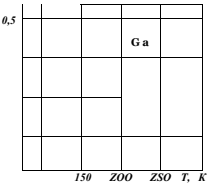


Рис. 26.13. Зависимости %а, Уь, tc для Ga от температуры [187]



Рис. 26.14. Зависимость t для Ge от температуры. Удельное сопротивление 44—46 Ом-см; концентрация примеси Sb ниже см^^ [94]

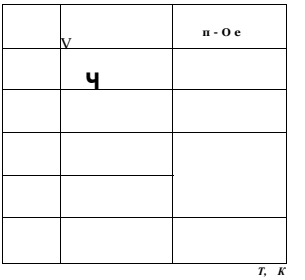


Рис. 26 15. Зависимоость х л"" *n — Ge* от температуры: **Концентрация носителей в оОрајаях- О. Л — см-'; • —)01« СН– 184**

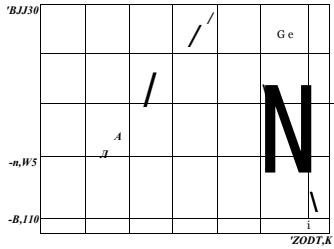


Рис. 26.16. Зависимость х Для Ge от температуры [130, 185]

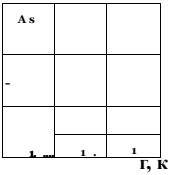


Рис. 26.17. Зависимости х ц и Xj^ Для As от температуры [188]

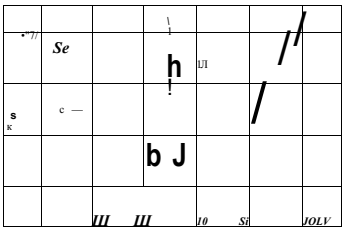


Рис. 26.18. Зг имость 7v для твердого п жидкого Se от температуры [101]:

О - гексагочал!

от T^^^ до 280 ш»н„ш (01-**7ри 45G"K); i**

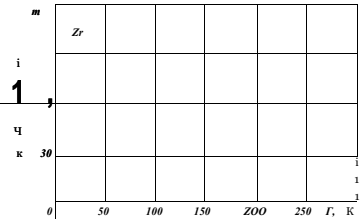
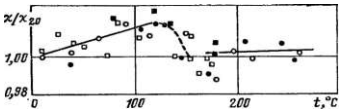


Рис. 26.19. Зависимости х ц и для Zr от темпера туры [189] (Я=8,75-10= А/м)



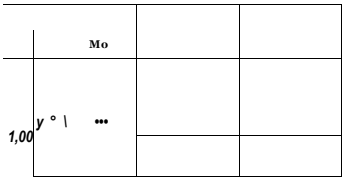
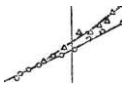


Рис. 26.20. Зависимость у/Xro Для Mo от температуры (X20 — восприимчивость при 20° С) [44] (точки — разаы." циклы измерений)

X/%20
2,0

1 7



иХреВ

26.21. Записи; ость ;<7V,o Д.'Я Rii и 1г от тег-лпературы (Z20- гь ири 2.:гС) [4]



Рис. 26.22 Зависимость х/Хго для Rh от температуры (Х2о — восприимчивость при 20°С) [44]

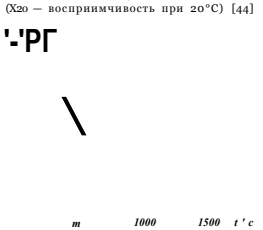


Рис. 26 23. Зависимость х/Хго для Pd от температуры <Х — восприимчивость при 20°С) [44]

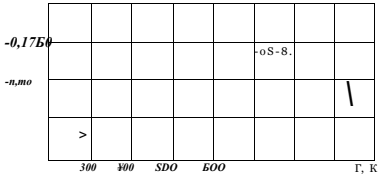


Рис. 26.24. Зависимость % для Ag от температуры [117]: **О —нормальный образец; |||—выдержка в течение 12 ч при температуре измерения; D —.обезгаженный образец**

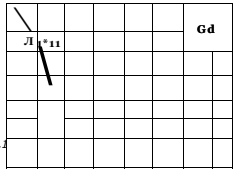


Рис. 26.25. Зависимости Хи и Хх Cd от температуры[118. 185)

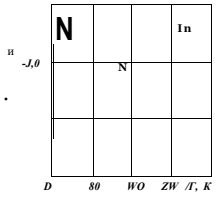


Рис. 26.26. Зависимости Х Ц " XX ДЛЯ In от температуры [127]

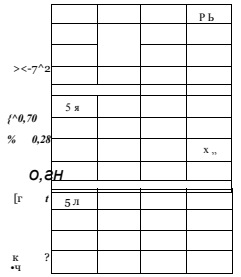


Рис. 26.27. Зависимости х для Sn и РЬ и Ах=Хх—Х II для Sn от температуры [127]

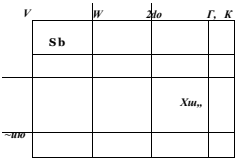


Рис. 26.28. Зависимости Хт „ и х^х Д^^ Sb от температуры [1901 j

7

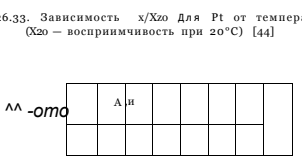


Рис. 26.33. Зависимость x/X20 для Pt от температуры (X20 — восприимчивость при 20°С) [44]

Рис. 26.34. Зависимость / для Аи от температуры [112]

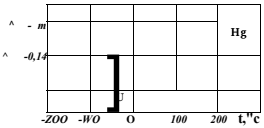


Рис. 26.35. Зависимость x Для Hg от температуры [185]:
О. А. • , ® ~ данные разных авторов

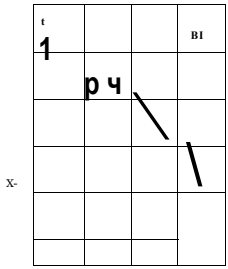


Рис. 26.36. Зависимости X у и Xj. Для Bi от температуры [185]

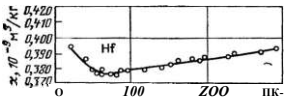


Рис. 26.29. Зависимость для твердого жидкого Te от температуры [101]:
О — нагрев; Щ — охлаждение

Рис. 26.30. Зависимость / для Hf от температуры [142]

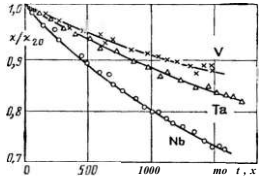


Рис. 26.31. Зависимость x/Xro для V, Ta, Nb от температуры (X20 — восприимчивость при 20°С)

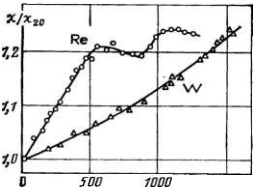


Рис. 26.32. Зависимость x/Xro для Re и W от температуры (X20 — восприимчивость при гО^С) [44]

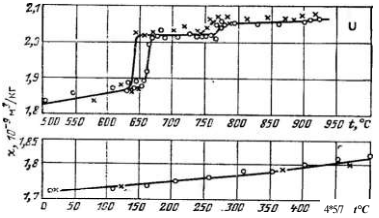


Рис. 26.37. Зависимость х Для U от температуры [176, 185]:

О — нагрев; X — охлаждение

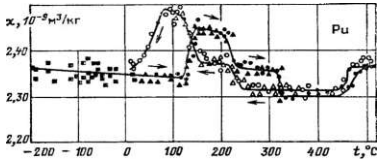


Рис. 26.38. ЗаБı'симость % для Ри от температуры [181, 185]:

^ ф — измсречья при нагреве; Д, О — при Н — при низких температурах

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CRC Handbook of Chemistry and Physics. Ed. 63"-". 1982—1983.

2. Havens G.//Phys. Rev. 1933. Vol. 43. P. 992—998.

3. Onnes H. K., Perrior A.//Proc. Acad. Sci. Amsterdam. 1911. Vol. 14. P. 115—122.

4. Kido K.//Sci. Rcpts. Tohoku Univ. 1932. Vol. 21. P. 149—151, 288—289, 869—872.

5. Ehrlich P.//Z. Anorgan. tind allgem Chem. 1942. Bd. 249. S. 219—224.

6. Cabrera B., Fahlenbrach H.//Ann. See. Espan. Fos. Quim. 1934. Vol. 32. P. 525—537.

7. Meyer St.//Phys. Z. 1925. Bd. 26. S. 51—54.

8. Witmer E. E./Phys. Rev. 1942. Vol. 61. P. 387—392.

9. Ceilings E. W.//J. Phys. Chem. Solids. 1905. Vol. 26. P. 949—954.

10. Foex G. Tables de Conslantes et Donnees Kiiineriques 7. Con?tantes Selectionnees Diamagnctisme el Paramagnetism'-. Paris. 1957.

11. Веркии Б. И., Дмитренко И. М., Свечкарев И .В.// Жури, эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40. С. 670—675.

12. Owen Л.//ЛПП. Phys. 1912. Bd. 37. S. 657.

13. Klcmra L.,7Z. Elcclrochem. 1939. Bd. 45. S. 354-357.

14. Hcnda K.'/Ann Phvs 1910. Vol. 32. P. 1003—1063.

15. Scloviev N. E., .^akarov V. S., Ugai Ya. A. e. a.// J. Less-Сотлоп. Met. 1979. Vol. 07. P. 161—164.

16. Kubler L., Gewinner G., Koulmann e. a.//Phys-Stat. Solidi (b). 1975. Vol. 69. P. 323—328.

!7. Hudgens S., Kastner M., Fritzsche H.//Phys. Rev. Lett. 1972. Vol. 33. P. 1552—1554.

18. De Haas W., van Alphen P. M.//Proc. Koninke Nederl. Acad. Wst. Amsterdam. 1933. Vol. 36. P. 263-270.

19. Mauroubi A., Flandorois S., Coulon C. e. a.// J. Phys. Chem. Sol. 1982. Vol. 43. P. 1103—1109.

20. Pascal P.//Compt. rend. 1908. Vol. 147. P. 56-58, 242—244, 742- 744; 1910. Vol. 150. P. 1167-1169; Ann. chimie et de phys. 1910. Vol. 19. P. 5—70.

21. Pascal P.//Compt. rend. Paris. 1909. Vol. 148. P 413—415.

22. Joussot-Dubien J., Lenianceau B., Pacault A.,, J. Chim. Phys. 1956. Vol. 53. P. 198—205.

23. Bitter F.//Phys. Rev. 1930. Vol. 35. P. 1572-1577.

24. De Fotis G. C.//Phys. Rev. B. 1981. Vol. 23. P. 4714—4740.

25. Laine P. Compt. rend. 1933 Vol. 196. P. 910-913.

26. Venskateswarlu K., Sriraman S.//Z. Naturforsch. 1958. Bd. 13a. S. 445—451.

27. Prasad M., Kanekar C. R.. Kaniat L. S.//J. Chem. Phys, 1951. Vol. 19. P. 686—689.

28. Ishiwara T.//Sci. Repts Tohoku Univ. Ser. I. 1914. Vol. 3. P. 303—319; 1916. Vol. 5. P. 53—61; 1920. Vol. 9. P. 233—240.

29. Meslin J./7Ann. chimie et de phys. 1906. Vol. 7. P. 145—194.

30. Pascal P.//Compt. rend. 1921. Vol. 173. P. 144-146, 712—714; 1922. Vol. 174. P. 457—460, 1698-1700; 1923. Vol. 175. P. 1063—1065.

31. Klemm W., Sodomann H., Langmesser P.// Z. Anorgan. und allgem. Chem. 1939. Bd. 241. S. 281—304.

32. Thomas J. G., Mendoza E.//Philos. Mag 1951. Vol. 43. P. 900—906.

33. Веркин Б. И., Свечкарев И. В.//Укр. физ. журн. 1962. Т. 7, № 3. С. 322—325.

34. Wilson J.//Proc. Roy. Soc. 1921. Vol. A98. P. 274—278; 1923, Vol. 103. P. 185—189.

35. Das D.//Indian J Phys. 1967. Vol. 41. P. 525-532.

36. Pascal P.//Conipt. rend. 1913. Vol 156. P. 323-327; 1914. Vol. 158. P. 37—38.

37. Суворова Л. Н., Байдаков Л. А.//Изв. АН СССР. Неорг. мат. 1977. Т. 13. С. 806—810.

38. Nilakantan P.//Proc. Indian Acad. Sci. (A). 1936. Vol, 4. P. 419—422.

39. Pascal P. Compt. rend. 1923, Vol. 176. P. 1887-1883; 1923. Vol. 177. P. 765—768.

40. Eudo H.;/Sci. Repts. Tonoku Univ. Ser. 1. 1925. Vol. 14. P. 479 -512.

41. Bommer H.//Z. Elektrochcm. 1939. Bd. 45. S. 357—362.

42. Volkenshtein N. V., Coloshlna E. V., Kost M. E. e. a.//Phvs. Slat. So!, (b). 1983. Vol. 117. P. K47 - K49.

43 VVedekind E./Д. Angew. Chemie. 1924. Bd. 37. S. 87—38.

44. Kojinia H., Tebble R. S., Wi!liams D. E. G././Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1961. Vol. 250. P. 237—250

45. Reekie J., Yao Y. L.//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1956. Vol. B69. P. 417—431

46. Mun-ster A., Lage! K./Z. Physik. 1956. Bd. 144. S. 139—145.

47. Gsrvais D., Basso-Bert M., Choukroum R. e, a.// C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. C. 1969. Vol. 269 P. 257-260.

48 Klemm W., Schuth W.//Z. anorgan und allgen. Chem. 1931. Bd. 201. S. 24—31.

49. Васильев Ю. В., Хрищева Д. Д., Ария С. М.// Журн. неорг. химии. 1963. Т. 8. С. 785—789.

50. Rudorff W., Luginsland H. H.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1964. Bd 334. S. 125—132.

51. Wedekind E., Horst C.//Ber. chem. Ges. 1912. Bd. 45. S. 262-270; 1915. Bd 48. S. 105—112.

52. Scolt B. A., Euienberger G. R., Bernheim R. A., J. Chem. Phys. 1968. Vol. 48. P. 263—268.

53. Conroy L E., Park K. C.//Inorg. Chem. 1968. Vol. 7. P. 459—467.

54. Haakon H., Kjekshug A., Rost E. e. a.//Acta. Chem. Scand. 1963. Vol. 17. P. 1283—1289.

55. Радовский И. З., Рабинович Б. С., Сидоренко Ф. А. и др./Др. Уральского политехи, ии-та. 1970. Т. 186. С. 155-157.

56. Robins D. A.//Phiios. Mag 1958. Vol. 3. P. 313—327.

57. Suzuki H., Miyahara S.//Phys. Soc. Japan. 1965. Vol. 20. P. 2102—2108.

58. Kriessman C. J.//Rev. Modern. Phys. 1953. Vol. 25. P. 122—126; Phys. Rev. 1954. Vol. 9. P. 837—844.

59. Whitteker A. G., Yost Don M.//J. Amer. Chem. Soc. 1949. Vol. 71. P. 3135—3137.

60. Roch J.//Compt. rend. 1959. Vol. 249. P. 56—65.

61. Gervais D., Choukroun R.//J. Inorg. Chem. 1974. Vol. 36. P. 3679—3687.

62. Clogston A. M., Gossard A. C., JaccarinoV. e. a.// Phys. Rev. Lett 1962. Vol. 9. P. 262—266.

63. Рыкова М. А., Сабирзянов А. В., Загряжский В. А. и др.//Тр. Уральского политехи, ин-та. 1970. Т. 186. С. 37—40.

64. Сидоренко Ф. А., Радовский И. З., Зел'-ккн Л. П. и др.//Порошковая металлургия. 1966. № 9. С. 68—74.

65. Tilk W., Klemni W.//Z. Anorgan. und allgem. Chem. 1939. Bd 240. S. 355—368.

66. Bartecki A., Wajda S.//Proc. Symp. Wroclaw, 1962. 1964. P. 305.

67. Stein B. F., Walmstey R. H.//Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 933—940.

68. Gambino R. J., Mc Guire T. R., Nakamura Y.// J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 1253—1255.

69. Радовский И. З., Шубина Т. С., Гельд П. В. к др.//Порошковая металлургия. 1965. № 2. С. 33—40.

70. Радовский И. З., Бортник А. Н.//Тр. Уральского политехи. ин-та. 1968. Т 167. С. 120—122.

71. Гельд П. В., Сидоренко Ф. А. Силициды переходных металлов четвертого периода. М.: Металлургия, 1971.

72. Levinson L. M.//J. Solid State Chem. 1973. Vol. 6. P. 126-135.

73. Holseth H.. Kjekshug A.//J. Less-Common Mels!s. 1968. Vol. 16. P. 472—481.

74. Boda G., Stenstrom B., Lugredo V. e. a.//Phys. Ser. 197i. Vol. 4. P. 132—137

75. Miyahara S., Teranishi T.//J. Appl. Phys. 1968 Vol. 39. P. 896—899.

76. Shinoda D., Asanabe S T.//J. Phys. Soc. JaDan 1966. Vol. 21. P. 555-561.

77. Nahigia.1 H.. Steger J. Mc Kinzie H. L. e. a.// //Inorg. Chem. 1974. Vol. 13. P. 1498—1507.

78. Heidelberg R. F., Lu\eni A. H., Fafhouk S.// //Ir.org. Chem. 1966. Vol. 5. P. 194—198.

79. Фролов А. А., Сидоренко Ф. А., Кренцис Р. П.// //Тр Уральского политехи ин-та. 1970. Т. 186- С. 18—

80. Yaccarino V.. VVertheim G. K.. V^ernick .!. R. e ... Pbvs. Rp" 1967 \'c\. |r=r r

'8i. Badg:er E. *U.* M., Griffith R. K., Ne.v-linp W. B. S.//Proc. Roy. Soc. 1949. \ o Alii/ P 1B3.

>2 Сидореико Ф. А., Д'»ирошнзков Л. А., Гельд П. В.//ИЗВ. вузов. Физика. № 5. С. 114—117.

83. Czanderna A. W.//J. Chem. Phys. 1966. Vol. 45 P. 3159—3167

84. Adou J. J., Baudet J.//J. chim. phys. 1967. Vol. 64. P. 1540—1547

85. Gautier F., Krill G., Panissod P. e. a.//J. Phys. C. 1974. Vol. 7. P. L170—L172.

86. Klemm W., SchCth W.//Z. anorgan. ur.d aligcm. Chem. 1931. Bd. 203. S. 104—108.

87. Either T. A., Bouchard R. J., Cloud W. H. e. a.// //Inorg. Chem. 1968 Vol. 7. P. 2208—2217.

88. Mac Clure J. W., Marcus J. A.//Phys. Rev. 1951 Vol. 84. P. 787—788

89. Зюбина Т. А., Торопцев В. П., Торопцев Ю. П. и др.//Изв. АН СССР. Неорг. материалы 1977. Т. 13. С. 355—357.

90. Pankey T.//J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31. P. 1802-1806.

91. Рустамов П., Алиев О. М., Курбанов Т. Х. и др.//Изв АН СССР. Неорг. материалы. 1977. Т. 13 С. 1748-1751.

92. Busch G. Л. Kern R.//Helv. Phys. Acta. 1959 Vel. 32. P. 24—57.

93. Довлетов К., Мархуда Ю. А., Аникин А. В. и др.//Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1978. Т. 14.

94. Van Itterbeek A., Duchateau W.//Physica. 1956 Vol. 22. P. 649—656; 1957. Vol. 23. P. 169—172.

95. Hedgcock F. T.//J. Electronics. 1957. Vol. 2 P. 513—515.

96. Bowes R.//Phys. Rev. 1957. Vol. 108. P. 683—689.

97. Stevens D. K., Cleland J., Grawford L. H. e. a.// Ibid. 1955. Vol. 100. P. 1084—1093.

98. Geist D.//Z. Physik. 1959. Bd. 157. S. 335—361; 490—498.

99. Bennett S., Heyding R. D.//J. Phys. Chem. Solids. 1966. VoL 27. P. 471—477.

100. Badley B. G., Disalvo F. J., Warszczak J. V.,,' Solid State Commun. 1972. VoL 11. P. 89—91.

101. Busch G., Risi M., Luan S.//Helv. phys. acta. 1960. Vol. 33. P. 1002—1013.

102. Honda K., Ishiwara T.//Sci. Repts Tonoku Univ. 1915. VoL 4. P. 215—260.

103. Rao S. R.. Sovithri K.//Proc. Indian ScL 1941. Vol 14A. P. 584—592.

104. De Monsabert W. R., Boudreaux E. A.//Phys. Chem 1958. Vol 62. P. 1422 1428.

105. Juza R., Rabenau A.. Nitgshke J.//Z. anorgan und allgem. Chem. 1964. Bd. 332. S. 1—9.

106. Trzebiatowski W., Stalinski B.//Bull. Acad, polon. sci. CL 1953. VoL 1. P. 317—318.

107. Горцева Ф. П., Дидченко Р. Неорг. химия. 1965. Т. 4. С. 182—184

108. Khan H. R., Raub C. J., Gardner W. E. e. a.// Alater. Res. BulL 1974. Vol. 9. P. 1129—1130.

109. Klemm W., Yacobi H., Tilk W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1931. Bd. 201. S. 1—23.

no. Fendins H.,'/Dissert. Hannover, 1931.

111 Morette A.//Compt. rer.d. 1942. Vol. 215. P. 86-

112 N-lson C. M., Boyd R. E.. Smith WmT.//J. Amcr. Chem. Soc. 1954. Vol. 76. P. 34S—352.

113. Fletcher J. M., Gardner W. R., Greenijield B. F. e. a.'/.I. Chem. Sor. (Jl) 19G8 Vol 1968 P 653—6-59.

114. Fletcher J. M., Gardner W. E., Hooper E. W. e. a-.'/Naturc. 1963. Vol. 199 P. ЮГЭ—1095.

115. lioare F. E., Matthews J. C.//Proc. Roy. Soc. :}52. Vol. Л212. P. 137-148,

116. Papatheodorou C. N.,'/Inorg. Nucl. Chem. LetL U;74. Vol 10. P. 115-117.

117. Garber M., Henry W. G., Hoeve H. G.//Canad. J. Phys. 1960. Vol. 38. P. 1595—1603.
118. Marcus J. A.//Phys. Rev. 1949. Vol. 76. P. 413—416, 621—627.
И9. Mookherji T.//J. Electrochem Soc. 1970. Vol. 117. P. I20I—1204.
120. Страхов Л. П., Римадханов К., Королев В. В.',' //Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1973. Т. 9. С. 645—

121. Singh S., Singh P.//J. Phys. Chem. Sol. 1980. Vol. 41. P. 135—139.
122. Пилат Ц. М.//Физика металлов и металловедение. 1957. Т. 4. С. 232—238.
123. Страхов Л. П., Крепкая В. П., Казенов^Б. А.//Физика твердого тела 1969. Т. 11. С. 3595—

124. Потыкевич И. В., Бондарь Г. И., Коваль В. С. и др.//Укр. физ. журн. 1983. Т. 28. С. 1072—1076
125. Сирота Н. Н., Виткина Ц. 3.. Антюков А. М. и др.// Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. 1976. № 2.

126. Verharghe H., Vandermeerssche G., Le Conepte C.//Phys. Rev. 1959. Vol. 80. P. 758—764.
127. Александров Б. Н., Веркин Б. И., Свечкарев И. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 39. С. 37-—40.
128. Busch G., Menth A., Natterer B.//Z. Naturforscli. 1964. Bd. 19a, S. 542—551.
129. Juza R., Hahn H.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1940. Bd. 244. S. 111—124.
130. Busch G., Kern R.//Helv. phys. acta. 1959 Vol. 32. P. 24-29.
131. Stevens D. K.. Crawford J. H.//Phys. Rev. 1955. Vol. 99. P. 487—488.
132. Darnell A. J., Libby W. F.// Ibid. 1964. Vol. A135. P. 1453—1459.
133. Broniewski W., Franczek S., Witkowski R.// //Ann. Phys. 1938. Vol. 10. P. 5—19.
134. Endo H.//Sci Repts. Tohoku Univ. 1927. Vol 16. P. 201—234.
135. Matyas M.//Czechoslov. J. Phys 1958. Vol. 8. P. 301—308.
136. De Haas W. J., van Alphen P. M.//Acad Sci. (Amsterdam). 1933. Vol. 36. P. 158—169.
137. Rao S. R., Venkataramiah H. S.//J. Mysore Univ B. 1948. Vol. 8, № 2. P. 39—46.
138. Lane C. T.//Phys. Rev. 1933. Vol. 44 P. 43—45
139. Lock J. M.//PfOC. Phys. Soc. (Lond.). 1957. Vol. B70. P. 476-479, 566-571.
140. Klemm W., Meisel K., von Vogel H.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1930. Bd 190. S. 123—144.
141. Kreissman C. J., McCuire T. R.//Phys. Rev. 1955. Vol. 98. P. 936—937.
142. Волкенштейн Н. В., Галошиина Э. В.//Физика металлов и металловедение. 1964. Т. 18. С 784—788.
143. Hall J. R., Marchunt N. K., Plowman R. A.// Australian J. Chemie. 1963. Vol. 16. P. 34—38.
144. Schafer H., Gerken R., Scholz H.//Z. anorgan. and allgem. Chem. 1965. Bd. 335. S. 96—103.
145. Brauer G., Weidlein J., Strahle J.//Ibid. 1966. Vol. 348. P. 298—307.
146. Крылов Е. И.//Журн неорг. химии. 1958. Т. 3. С. 1487—1489.
147. McCarley R. E., Brown T. M.//lnorg. Chem. 1964. Vol. 3. P. 1232—1236
148. Fendins H.//Dissert., Hannover, 1931.
149. Gibart P.//Compt. rend. 1964. Vol. 259. p. 4237—4241.
150. Biltz W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1930. Bd. 214. S. 227—236.
151. Greincr J. D., Shanks H. R.//J. Solid State Chem. 1972. Vol. 5. P. 262—266.
152. Cheretieii A., Odent G.//Compt. rend. 1963. Vol. 257. P. 2290 2295.
153. Thaore K.//Bull. Soc. chim. France. 1965. P. 1284.
154. Белова В. И., Семенов И. Н.//Журн. неорг. химии, 1971, Т. 16. С. 2871—2875.
155. Machmer P.//Z. Naturforsch. 1969. Vol. 24B. P. 200—208.
156. Schuber H., Huneke K. H., Brendel C.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1971. Bd. 383. S. 49—56.
157. Белова В. И. Сыркин Ю. К.//Журн. неорг. химии, 1958. Т. 3. С. 2016—2021.
158. Колбин fl. И.. Самойлов В. М.//Журн. неорг. химии, 1968, Т. 13. С. 906—909.
159. Brodersen K., Machmer P.//Naturforsch 1962 Bd. 176. S. 127—133.
160. Ryden W. D., Lawson A. W.//J. Chem. Phys. 1970, Vol. 52. P. 6058-6064.
161. Gouthrie A. N.. Bourland L. T.//Phys. Rev. 1931. Vol. 37. P. 303—308.
162. Brodersen K., Thiele G., Schnering H. G.// //Z. anorgan. und allgem. Chem. 1965. Bd. 337. S. 120-128.
163. Argue G. R., Banewicz J. J.//Inorg. Nucl. Chem. 1963. Vol. 25. P. 923—927.
164. Gronvold F., Haraldsen H., Kjikshus A.//Acla Chem. Scand. 1960. Vol. 14. P. 1879- 1886.
165. Rao S. R., Sriraman S.//Proc. Indian Acad. Sci. 1937. Vol. 5A. P. 343—350.
166 Vogt E.//AIIП. Phys. 1932. Bd. 14. S. 1—39.
167. Bates L. F., Baker C. I. W.//Proc. Phys. Soc. (Lond.) 1938. Vol. 50. P. 409—412.
168. Rao S. R., Narayanaswamy A. S.//Philos. Mag. 1938. VoL 26. P. 1018—1030.
169. Pascal P., Minne P.//Compt. rend. 1931. Vol. 193. P. 1303—1305.
170. Mikhail H., Mekkawy J.// Czech. J. Phys. 1978. Vol. B28. P. 216-222.
171. Shoenberg D., Uddin M. Z.//Proc. Roy. Soc. 1936. Vol. A156. P. 687—701.
172. Kapitza P.//Proc. Roy. Soc. 1931. Vol. AI31. P. 224—273.
173. Rao S. R. J.//J. Mgsore Univ. B. 1945. Vol. 5. №2 P. 69—77.
174. Smith J. F.. Greiner J. D.//Phys. Rev. 1959. Vol. 115. P. 884—891.
175. Trzebiatowski W., Selwood P. W.//J. Amer Chem. Soc. 1950. Vol. 72. P. 4501—4506.
176. Bates L. F., Hughes D.//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1954. Vol. B67. P. 28—37.
177. Henkel P., Klemm W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1935. Bd. 222. S. 70—72.
178. Picon M., Flahaut J.//Compt. rend. 1953. Vol. 237. P. 1160—1162.
179. Picon M., Flahaut J.//Ibid. 1955 Vol. 240. P. 784—785.
180. Khodadad P.//Ibid. 1958. VoL 247 P. 1205-1209.
181. Brodsky M. B.//Insl. Phvs. Lond. 1971. Conference Didest Rare Earth and Actinides. № 3. P. 75—83.
182. Seguin M.//Ibid. 1958 Vol. 246. P. 3243-3246.
183. Гречнев Г. Е., Свечкарев И. В., Середа Ю. П.// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1978. Т. 75. С. 993—998.
184. Landolt-Borhstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series. Group III. Vol. 17e. P. 284.
185. Landolt-Bornstein, Zahlenwerte und Funktionen. Ed. 6-th, 1962. Bd. II, 9 teil.
186. Bohm B., Klemm W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1939. Bd. 243. S. 69—85.
187. Marchand A.//Compt. rend. 1955. Vol. 241. P. 468—470.

188. Yamaguchi Y.//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 833-835.
189. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В., Щеголихина Н. И.//Физика металлов и металловедение. 1968. Т. 25. С. 180-185.
190. Browne S. **H.**, Lane C. **T**.//Phys. Rev. 1941. Vol. 60. P. 895—899.
191. Klemni W., Hoschek E.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1936. Bd. 226. S. 359—369.
192. Clark J. K.. Machin D. J.//J. Chem Soc. 1963. P. 4430-4437.
193. Nyholm R .S., Sharpe A. G.//J Chem. Soc. 1952. P. 3579-3587.
194. Juza D., Giegling D., Schaber H.//Z. anorgan. und aligem. Chem. 1969. Bd. 366. S. 121—130.
195. Воробьев Н. И., Печковский В. В., Кобец Л. В.//Журн. неорг. химии. 1974. Т. 19. С. 3—6.
196. Cadeville M. C.//J. Phys. Chem. Sol. 1966. Vol. 27. P. 667—674.
197. Проскуриков А. А., Крылов Е. И.//Ж\рн. неорг. химии. 1965 Т. 10. С. 1017—1021.
198. Hume D. N., Stone H. W.//J. Amer. Chem. Soc. 1941. Vol. 63. P. 1200-1209.
199. Hoppe R., Daehne W., Klemm W.//Ann. Chem. 1962. Vol. 658. P. 1 — 14.
200. Zernicke J.//Rec. Trav. Chim. 1953. Vol 72. P. 390-397.
201. Williams E. H.//Phvs. Rev. 1926. Vol. 28. P. 167-173.
202. Haraldsen H., Gronvold F., Hurlen T.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1956. Bd. 283. S. 143—164.
203. Furuseth S., Kjekshus A., Andersen A. F.//Acta Chem. Scand. 1969. Vol. 23. P. 2325—2329.
204. Vandenbempt £., Pauwels L., de Clippeleir K.//
//Bull. Soc. Chim. Belg. 1981. Vol. 80. P. 283.
205. Uchida E., Kondoh H.//J. Phys. Soc. Japan. 1955. Vol. 11. P. 21-28.
206. Munson R. A., de Sorbo W., Koubel **J.** S.//
III Chem. Phys. 1967. Vol. 47. P. 1769—1784.
207. Lewig J., Machin D. **J.**, Newnham **I.** E. e. **a.**//
III Chem. Soc. 1962. № H. p. 2036—2044.
208. Ehrlich P., Ploger F., Pietzka G.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1955. Vol. 282. S. 19—27.
209. Rudolf W., Luginsland H. H.//Ibid. 1964. Bd. 334. S. 125—138.
210. Klemm W., Steinberg H.//Ibid. 1936. Bd. 227. S. 193-213.
211. Schafer H., v. Schnering H. G., Tillack J.//Ibid. 1967. Bd. 353. S. 281—297
212. Kepert D. L., Mandyszewshy R.//Inorg, Chem. 1968. Vol. 7. P. 2091—2098.
213. Knox K., Coffey G. E.//J. Amer. Chem. Soc. 1959. Vol. 81. P. 5—13.
214. Holloway J. H., Peacock R. D.//J. Chem. Soc. 1963. P. 3892—3898.
215. Тейлор К., Дарби М.//Физика редкоземельных соединений/Пер. с англ. М.: Мир. 1974.
216. Brown D. A., Glass W. K., O'Daly C.//J. Chem. Soc. Dalton. Trans. 1973. № 12. P. 1311—1315.
217. Brisdon B. L., Edwards D. A., Machin D. J.//J. Chem. Soc. (A). 1967. P. 1825—1829.
218. Perakis N.//J. Phys. Radium. 1954. Vol. 15. P. 191.
219. Brown D., Colton R.//J. Chem. Soc. 1964. P. 714 717.
220. Schiith W., Klemm W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1934. Bd. 220. S. 193—198.
221. Colton R., Farthing R .H.//Australian J. Chem. 1968. Vol. 21. P. 589—597.
222. Hargreaves G. B., Peacock R. D.//J. Chem. Soc. 1960. Xb 11. P. 2618—2626.
223. Hargreaves G. B., Peacock R. D.//Proc. Chem. Soc. 1959. № 1. P. 85—89
224. Glemser O., Roesky H. W., Hellberg K. H. e. a.//
//Chem. Ber. 1966. Bd. 99. S. 2652—2663.
225. Bose D. M., Bhar H. G.//Z. Physik. 1928. Bd. 48. S. 716—721.
226. Figgis B. N.. Lewis J., Mabbs F. E.//J. Chem. Soc. 1961. P. 3138—3147.
227. Nast R., Hcerl W.//Chem. Ber. 1962. Bd. 95. S. 1470—1475.

Глава 27

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

К. г. Гуртовой

27.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Вещества, обладающие спонтанным магнитным моментом, т. е. имеющие конечную намагниченность при достаточно низкой температуре и нулевом внешнем магнитном поле, называются ферромагнетиками в широком смысле слова. При этом упорядочение спиновых и орбитальных моментов электронов в этих веществах не обязательно имеет простой характер {см. структуры «Конус» и «Ферри» на рис. 27.16) Для ферромагнетиков характерны зависимости магнитной проницаемости от внешнего магнитного поля и предыстории образца, а также существование температуры, выше которой вещество переходит в парамагнитное состояние с нулевым спонтанным магнитным моментом.

Намагниченность и магнитная индукция. Магнитный момент единицы объема магнетика называют намагниченностью. Намагниченность J, А/м, магнитная индукция В, Тл, и напряженность магнихрого поля **H**, АУм, связаны известным соотношением:

$$B = tXo(H + J),$$

где Цо=4я-10-^ Гн/м — магнитная постоянная.

Если эллипсоидальный образец магнетика находится во внешнем магнитном поле **H**, то поле внутри образца **H**/ определяется формулой

$$Hr = H - /VJ,$$

где ***N*** — тензор размагничивающих коэффициентов (факторов).

В ферромагнетиках намагничивание из состояния с нулевой индукцией изображается кривой намагничивания ***ОА*** (или ***ОА'***) (рис. 27.1), описывающей зависимость магнитной индукции (или намагниченности) от Н. Намагниченность с ростом поля достигает предела *Js,* называемого намагниченностью насыщения При перемагничивании зависимость ***B(H)*** [или ***J(H)***] образует характерную S-образную кривую — петлю гистерезиса

188. Yamaguchi Y.//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 833-835.
189. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В., Щеголихина Н. И.//Физика металлов и металловедение. 1968. Т. 25. С. 180-185.
190. Browne S. **H.**, Lane C. **T**.//Phys. Rev. 1941. Vol. 60. P. 895—899.
191. Klemni W., Hoschek E.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1936. Bd. 226. S. 359—369.
192. Clark J. K.. Machin D. J.//J. Chem Soc. 1963. P. 4430-4437.
193. Nyholm R .S., Sharpe A. G.//J Chem. Soc. 1952. P. 3579-3587.
194. Juza D., Giegling D., Schaber H.//Z. anorgan. und aligem. Chem. 1969. Bd. 366. S. 121—130.
195. Воробьев Н. И., Печковский В. В., Кобец Л. В.//Журн. неорг. химии. 1974. Т. 19. С. 3—6.
196. Cadeville M. C.//J. Phys. Chem. Sol. 1966. Vol. 27. P. 667—674.
197. Проскуриков А. А., Крылов Е. И.//Ж\рн. неорг. химии. 1965 Т. 10. С. 1017—1021.
198. Hume D. N., Stone H. W.//J. Amer. Chem. Soc. 1941. Vol. 63. P. 1200-1209.
199. Hoppe R., Daehne W., Klemm W.//Ann. Chem. 1962. Vol. 658. P. 1 — 14.
200. Zernicke J.//Rec. Trav. Chim. 1953. Vol 72. P. 390-397.
201. Williams E. H.//Phvs. Rev. 1926. Vol. 28. P. 167-173.
202. Haraldsen H., Gronvold F., Hurlen T.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1956. Bd. 283. S. 143—164.
203. Furuseth S., Kjekshus A., Andersen A. F.//Acta Chem. Scand. 1969. Vol. 23. P. 2325—2329.
204. Vandenbempt £., Pauwels L., de Clippeleir K.//
//Bull. Soc. Chim. Belg. 1981. Vol. 80. P. 283.
205. Uchida E., Kondoh H.//J. Phys. Soc. Japan. 1955. Vol. 11. P. 21-28.
206. Munson R. A., de Sorbo W., Koubel **J.** S.//
III Chem. Phys. 1967. Vol. 47. P. 1769—1784.
207. Lewig J., Machin D. **J.**, Newnham **I.** E. e. **a.**//
III Chem. Soc. 1962. № H. p. 2036—2044.
208. Ehrlich P., Ploger F., Pietzka G.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1955. Vol. 282. S. 19—27.
209. Rudolf W., Luginsland H. H.//Ibid. 1964. Bd. 334. S. 125—138.
210. Klemm W., Steinberg H.//Ibid. 1936. Bd. 227. S. 193-213.
211. Schafer H., v. Schnering H. G., Tillack J.//Ibid. 1967. Bd. 353. S. 281—297
212. Kepert D. L., Mandyszewshy R.//Inorg, Chem. 1968. Vol. 7. P. 2091—2098.
213. Knox K., Coffey G. E.//J. Amer. Chem. Soc. 1959. Vol. 81. P. 5—13.
214. Holloway J. H., Peacock R. D.//J. Chem. Soc. 1963. P. 3892—3898.
215. Тейлор К., Дарби М.//Физика редкоземельных соединений/Пер. с англ. М.: Мир. 1974.
216. Brown D. A., Glass W. K., O'Daly C.//J. Chem. Soc. Dalton. Trans. 1973. № 12. P. 1311—1315.
217. Brisdon B. L., Edwards D. A., Machin D. J.//J. Chem. Soc. (A). 1967. P. 1825—1829.
218. Perakis N.//J. Phys. Radium. 1954. Vol. 15. P. 191.
219. Brown D., Colton R.//J. Chem. Soc. 1964. P. 714 717.
220. Schiith W., Klemm W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1934. Bd. 220. S. 193—198.
221. Colton R., Farthing R .H.//Australian J. Chem. 1968. Vol. 21. P. 589—597.
222. Hargreaves G. B., Peacock R. D.//J. Chem. Soc. 1960. Xb 11. P. 2618—2626.
223. Hargreaves G. B., Peacock R. D.//Proc. Chem. Soc. 1959. № 1. P. 85—89
224. Glemser O., Roesky H. W., Hellberg K. H. e. a.//
//Chem. Ber. 1966. Bd. 99. S. 2652—2663.
225. Bose D. M., Bhar H. G.//Z. Physik. 1928. Bd. 48. S. 716—721.
226. Figgis B. N.. Lewis J., Mabbs F. E.//J. Chem. Soc. 1961. P. 3138—3147.
227. Nast R., Hcerl W.//Chem. Ber. 1962. Bd. 95. S. 1470—1475.

Глава 27

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

К. г. Гуртовой

27.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Вещества, обладающие спонтанным магнитным моментом, т. е. имеющие конечную намагниченность при достаточно низкой температуре и нулевом внешнем магнитном поле, называются ферромагнетиками в широком смысле слова. При этом упорядочение спиновых и орбитальных моментов электронов в этих веществах не обязательно имеет простой характер {см. структуры «Конус» и «Ферри» на рис. 27.16) Для ферромагнетиков характерны зависимости магнитной проницаемости от внешнего магнитного поля и предыстории образца, а также существование температуры, выше которой вещество переходит в парамагнитное состояние с нулевым спонтанным магнитным моментом.

Намагниченность и магнитная индукция. Магнитный момент единицы объема магнетика называют намагниченностью. Намагниченность J, А/м, магнитная индукция В, Тл, и напряженность магнихрого поля **H**, АУм, связаны известным соотношением:

$$B = tXo(H + J),$$

где Цо=4я-10-^ Гн/м — магнитная постоянная.

Если эллипсоидальный образец магнетика находится во внешнем магнитном поле **H**, то поле внутри образца **H**/ определяется формулой

$$Hr = H - /VJ,$$

где ***N*** — тензор размагничивающих коэффициентов (факторов).

В ферромагнетиках намагничивание из состояния с нулевой индукцией изображается кривой намагничивания ***ОА*** (или ***ОА'***) (рис. 27.1), описывающей зависимость магнитной индукции (или намагниченности) от Н. Намагниченность с ростом поля достигает предела *Js,* называемого намагниченностью насыщения При перемагничивании зависимость ***B(H)*** [или ***J(H)***] образует характерную S-образную кривую — петлю гистерезиса

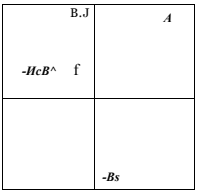


Рис. 27.1. Зависимости магнитной индукции *В* и намагниченности *J* ферромагнитного материала от напряженности поля *Н*

(рис. 27.1). Точки пересечения петли гистерезиса с осями ординат и абсцисс дают значения соответственно остаточной индукции B_r (**или** остаточной намагниченности /г) и коэрцитивной силы Ясе (или Ны).

Часто для описания магнетиков используют удельный магнитный момент (иначе удельную намагниченность) а, т. е. магнитный момент единицы массы.^ Единица удельного магнитного момента в СИ — А-м-/кг, в системе СГСМ — Гс-см^/г (в англоязычной литературе — emu/g). Иногда в качестве магнитной характеристики **приводят атомный магнитный момент п, т.** е. средний магнитный момент, приходящийся иа атом или на формульную единицу вещества; его измеряют в магнетонах Бора Не. Удельный и атомный магнитные моменты связаны с соотношением

$$„= (M//V„ \quad Ид \ )o,$$

где ***М*** — молярная масса, соответствующая формульной единице вещества, кг-моль-'; *ЛА* — постоянная .Авогадро, моль-'.

Точка Кюри и точка компенсации. Температура *Тс,* при которой магнетик переходит из ферромагнитного в парамагнитное состояние, называется температурой или точкой Кюри. В некоторых интерметаллидах со сложной магнитной структурой при так называемой температуре компенсации Ткуч< спонтанная намагниченность обращается в нуль вследствие компенсации составляющих ее иамагниченностек магнитных подрешеток.

Магнитная восприимчивость и проницаемость. Зависимость ***J от И*** представляется в виде $I=\chi H$, где Х — магнитная восприимчивость (объемная^ а З'чкгч-мость **В от Я** принято записывать в виде $B =$ где На — абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м. Таким образом, восприимчивость п проницаемость связаны соотношением

$$\mu = \qquad - 1 = Уг - 1 ,$$

где ц, = (Ха/!ш — относительная магнитная проницаемость вещества. Дифференцирование индукции по полю дает относительную дифференциальную магнитную проницаемость

$$= \qquad \{(iBidH).$$

Эта величина в слабых полях косит названме относительной начальной проницаемости, а максимальное ее значение ***ша*** всей кривей намршичивания — относительной максимальной ппоиииасмости.

При температурах Г>Г.- парамагнитная восприпичивость многих магнетиков достаточно хорої';о опнгываются законо.м Кюрн - Bt-ficca

$$x = c , (Г - \quad у ,$$

где С = ЗД- в;. — парамагнитная **тЕмпг**ратура Кюри, К. Здесь \ -- Уоля|_!Ный ч'•/.«о.ч,; — Эффективный атомный магнитный момент, k — постоянная Больцмана.

Кроме определенной выше магнитной восприимчивости единицы объема >•, часто используют удельную восприимчивость Хр и молярную восприимчивость Хт, т е. воспри!1Мч[[вости в расчете на единицу массы или моль вещества. Эти величины связаны между собой формулами

$$Хр = Х/Р \text{ и } х_{„} = -Ср Л1,$$

где р — плотность, кг/м\

В СИ и системе СГСМ объемная восприимчивость — безразмерная величина, удельная восприимчивость выражается в М^КГ И СМ-Т (в англоязычной литературе — в emu/g), а молярная восприимчивость — в м®/моль и см-'/моль (в англоязычной литературе — в emu/mol).

Единица абсолютной магнитной проницаемости в СИ — Гн/м. В системе СГСМ магнитная проницаемость И, определяемая формулой fi = (xH, безразмерна (как и относительная проницаемость в СИ).

Магнитная анизотропии. Различие магнитных свойств ферромагнетика вдоль [(еэквивалентных направлений в теле, называемое магнитной анизотропией, наиболее выражено с монокристаллах. Мерой магнитной анизотропии является работа иамагни^ивания, необходимая для поворога вектора J из положения вдоль оси легкого намагничивания, вдоль которой этот вектор направлен в отсутствие поля, в новое положение — вдоль внешнего поля Эта работа определяет плотность свободной энергии магнитной анизотропии £а, Дж/м^ которая следующим образом выражается через углы **между вектором** намагниченности J и кристаллографическими осями:

1) для кубических кристаллов

где 0.1, П2 и Из — направляющие косинусы вектора J;

S 4- а? а5

2) для гексагонпльгых кристаллов

$$Ea=KiSin4+ \qquad \dots ,$$

где — угол между вектором J и гексагональной осью *с.*

Магиитострикция. Изменение размеров и формы тела **мри** его намагиичнвании называют магнитострикцией. Различают объемную магнитострикцию, характеризуемую относительным кзмспеяием объема тела m = AV/V, и анизотропную магнитострикцию, характеризуемую относительным изменением размеров тела К^Mjl почти без изменения его объема Иногда этот вид магнитострикции не совсем точно называют линейной магнитострикцией.

Магиитострикция насыщения, т. е. магиитострикция, возникающая при намагничивании кристалла до насы-ПЮпия, для кубически-; кристаллов определяется формулой

$$\wedge \quad ; \quad ' \quad " \quad (2/3)5-?•?) \cdot$$

$$\wedge \quad . \quad \wedge \quad - \quad - \quad \wedge \qquad м \ ;,)- \ \dots -М,$$

- ••е а, !! Р — I '•'р-ч ^ рііусМ лгчтєра J и

пектора, вдоль которого производится намерение маг-Еитострикцик; Л=/г35, если направление легкого намагничьвачия — ось [100]; Л=Аг (s—73), если направление легкого нак5агиич)1дан:!я — ось [Ш].

Продольная (а, = р,) мапилострикция вдоль главных кристаллографических осей кубического кристалла определяется формулами

$$= (2/3)\ (1ц\ -\ 1н),\quad \text{Ацо} = (1/12)\ (2/\text{ii} + 6/\text{r}^{\wedge}\quad h^{\wedge}),$$

$$'\cdot \text{т} = (2/9)(3/\text{ц} + \text{Л5}).$$

Часто можно положить h-, = hi = hj = о и пользоваться упрощенной формулой

$$\text{I} = (3/2)\qquad (\text{S} - 1/3) + \qquad \text{a},\qquad -\text{f}$$

Рз).

Для поликристаллического материала анизотропную магнитострикцию можно получить из соотношения

$$X = (3/2)\ X^{\wedge}\ (\cos^{\wedge}!) - 1/3),$$

где As= (2Ai0o+3^m)/5, а — угол между вектором J к направлением измерения

Магнитострикция насыщеиия гексагональных кристаллов описывается выраженмем

$$= \qquad \%\ + \qquad -\ (\text{a},\ \text{Si}\ 4\text{-}\ \text{аг}\ \text{h}\ )\ «3 \qquad +$$

Направляющие косинусы и., р, относятся к системе прямоугольных координат, где оси \(х) и 2(у) совпадают с направлением о и 6, а ось 3 (г) — с гексагональной осью с (см. рис. 27.35).

Для поликристаллического материала продольная магнитострикция насыщения может быть получена по формуле

$$= (2/5)\text{Хд}\ 4\text{-}(8/15)\text{Хд}\ .$$

Поперечная магнитострикция насыщения (т. е. магнитострикция, измеряемая в направлении, перпендикулярном J) выражается формулой

$$X^{\wedge} = (2/15)\text{ХД}\ +(1/3)(\text{Хв}\ \text{-ЬХС}\ )\text{-}(4/15)\text{ХО}\ .$$

Для гексагональных кристаллов редкоземельных металлов (см рис. 27.32—27.34) применяют отличные от приведенного выше выражения для магнитострикции насыщения

$$,\ (\text{«'t}\ h\ \text{'f «2} \qquad - \qquad - \qquad]\ +$$

$$4\text{-}\ D\ (1\ -\ \ )\ (1\ -\ \ )\ +\ £\ 4 \qquad 1\ -\ «3)\ +$$

$$+\ F4\ (1\ \_\ 4)\ +\ G32(1\ \_\ 4)\ +\ Ha,\ S8\ (a,\ \text{Jii}\ +\ a,$$

$$^{\wedge}\ /.3\ 4\ («1 \qquad + \qquad (1\ -\ П)\ +\ к4\ -л\ \cdot$$

(Иногда обозначают $C = >/-^{\wedge}2$, $Л = —X'-^{\wedge})$

Магнишмягкие материалы. Магнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагни-|;кваются в относительно сл.эоых магнитных нолях напряженностью 10-7-10® А/м, относятся к магнитомягким. Для этих материалов характерны высокие значения огносительной магнитной проницаемости — начальной **Цгиач=** ~ и максимальной **И'шах**—Ю^-^-Ю'^. Коэрцитивная сила Не магнитомягких материалов составляет обычно от 1 до 10^ А/м, а потери на магнитный гистерезис очень малы — 1 — 10^ Дж/м^ на один цикл перемагничивания. Для многих материалов в качестве справочной характеристики приводят удельные потери, т. е мощность потерь ***Р,*** на частотах перемагничивающего поля 50 или 400 Гц при различных значениях амплитуды индукции (например, Pi.nso — мощность потерь на частоте 50 Гц при индукции, равной 1,0 Тл).

Магнитострикционные матертилы. Основными характеристиками магнитострикцнонных материалов (см табл. 27.32), применяющи.чся для изготовления магнитострикционных преобразователей, являются: коэффициент магнитомеханической связи К, квадрат которого равен отношению преобразованной энергии (механической или магнитной) к подводимой (соответственно магнитной или механической), динамическая магн.итострикционная постоянная a=(do/d/J)E и магь'итострикционная постоянная чувствительности ***A=(oB1a)u,*** где о — механическое напряжение, ***H/M-, В*** — магнитная индукция, Тл, а индексы ***Е и Н*** означают неизменность деформации и магнитного поля. Величина о существенна для работы излучателей, а Л — для работы приемников. Плотность р и модуль Юнга ***Е*** определяют резонансную частоту преобразователей; от механической прочности, магнитострикции насыщения Ks и индукции насыщения Ss зависит предельная интенсивность магнитострикционных излучателей; механическая добротность ***Q,*** удельное электрическое сопротивление рач и коэрцитивная сила Не определяют потери энергии на вихревые токи и гистерезис при работе преобразователя. Значения ***К, а,*** Л существенно зависят от напряженности подмагничивающего поля, значение которого Нот, отвечающее максимуму К, обычно называют оптимальным.

Магнитотвердые материалы. К магнитотвердым относятся материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью 10^-^.10^ А/м Магнитотвердые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы Не, остаточной индукции ***В,*** и максимальной плотности магнитной энергии (ЙЯ)тах на участке ***В.,*** — ***Нев*** размагничиваний петли гистерезиса (рис. 27.1).

В § 27.1 и 27.3 в каждом !'з пунктов, объединяющих ту или иную группу металл[ических ферромагнетиков, сначала приводятся температурные зависимости парамагнитной восприимчивости.,' зависимо-ти намагниченности, у.льного или атомного магнитного моментов от температуры, магнитного поля, состава сплавов и зависимости тем[[ературы Кюри с[!.тавов от их состава Затем идут данные по магнитно:! анизотропии и, на конец, по магнитострпг<!П!и

При отборе материала не стапплась задача дости'-ь всеобъемлющей полноты, а делалась попытка отразить совреиенное состояи[1е i! тев'деинии развптчя физикч

магыитных явлений. В главе дается также информация как о наиболее распространенных отечественных технических магнитных материалах, так и о перспективных материалах, едва вышедших за пределы лабораторий.

Наиболее полные сведения о магнитных свойствах ферромагнитных металлов и сплавов можно найти в монографиях [3, 4, 59]. Свойства металлических ферромагнитных материалов описаны в учебнике [25] и справочниках [26—28]

27.2. ЭЛЕМЕНТЫ

27.2.1. Железо, кобальт, никель. Среди переходных d-металлов ферромагнитны только Fe, Со и Ni (3 d-металлы), составляющие основу почти всех магнитных материалов. В табл. 27.1 — 27.5 и на рис. 27.2—27.15 содержатся сведения об их магнитных свойствах. Обзор магнитных свойств этих металлов дан в [ПО].

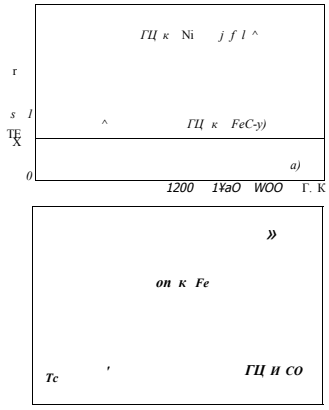


Таблица 27.2- Зависимости относительной намагниченности JsU^ для Fe, Со и Ni от относительной температуры ***ИТ^*** [30]

ТТ С	Fe	Co. Ni	ТТС	Fe	Co. Ni
0	1	I	0,7	0,85	0,83
0,1	0,996	0,996*	0,8	0,77	0,73
0,2	0,99	0,99	0,85	0,70	0,66
0.3	0,975	0,98	0,90	0,61	0,56
0.4	0,95	0,96	0,95	0,46	0,40
0,5	0,93	0,94	1	0	0
0,6	0,90	0,90			

' **Только для Ni.**

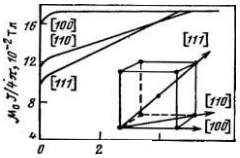


Рис. **27.3.** Кривые намагничивания для основных кристаллографических направлен^й^монокристалла Fe при

Рис. 27.2. Температурные зависимости обратной молярной парамагнитной восприимчивости для гранецентрированиого кубического Ni [31] и гранецентрированно!! кубической \'-фазы Fe fo), а также для объемноцентрированных кубических Р- и 6-фаз Fe и гранецентрированной кубической фазы Со (б) [91]

Таблица 27.1. Основные магнитные свойства Fe, Co, Ni

Элемент	h • м'/кг		г^.К	^^(4.2К). A-MVKF	(287 К). А - мм/кг	Литература
Fe	221,71(0,08)	2,216 2,226	1044 (2)	222,671	218,210	l i l
Со*	162,55	1,715 1,729 (H lie) 1,721 (H ‖ [100] в базисной плоскости)	1388 (2)	163,862 (H 11 c) 163,078 (H II (1001 в базисной плоскости;	162,624	
Ni	58,57 (0,03)	0,616 0,619	627,4(0,3)	58,872	55,370	[55] [94]

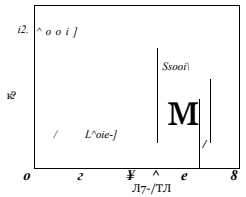


Рис. 27.4. Кривые намагничивания для основных кристаллографических направленга^^ монокристалла Со при

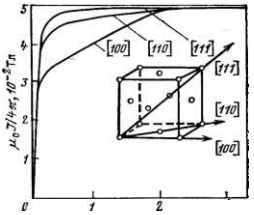


Рис. 27.5. Кривые намагничивания для основных кристаллографических направлений монокристалла Ni при Г=20°С [73]

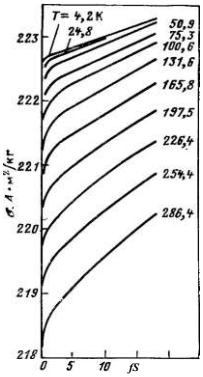


Рис. 27.6. Кривые намагничивания кристалла Fe в сильных мвшитных полях при различных температурах. Намагниченности вдоль осей [100], [ПО] и [111] различаются здесь менее чем на 0,05%. Кривые проведены по средним значениям этих намагниченностей; Но^i — индукция внутреннего магнитного поля [94]

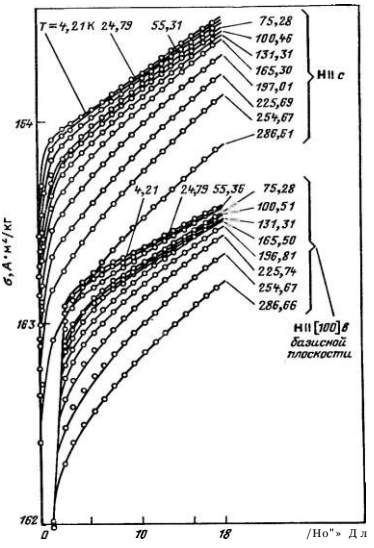


Рис. 27.7. Кривые намагничивания гексагонального кристалла Со в сильных магнитных полях при различных температурах; ***Hi. И*** — внутреннее и внешнее магнитные поля, *с* — гексагональная ось [94]

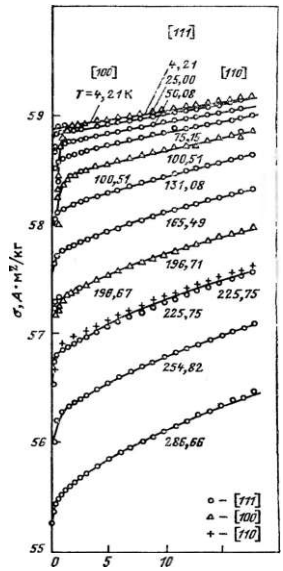
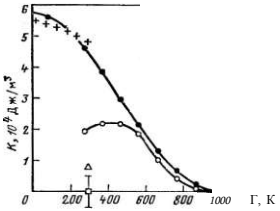


Рис. 27.8. Кривые намагничивания кристалла Ni в сильных магнитных полях при различных температурах. **Но** ***Hi*** — индукция внутреннего магнитного поля **[94]**



Ряс. 27.9. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии Fe

Рис. 27.11. Температурные зависимости констант магнитокристаллографической гнизотропии Ni из [57] (а, кружки — первая работа [57], крестики — вторая) и [32] (б)

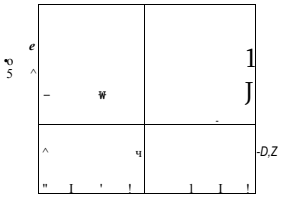


Рис. 27.10. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии Со для гсксагональыюй (с) и кубической гранецентрированной (б) фаз:
кривые с экспериментальными точками — данные [69, ,104}, кривые без экспериментальных точек- данные

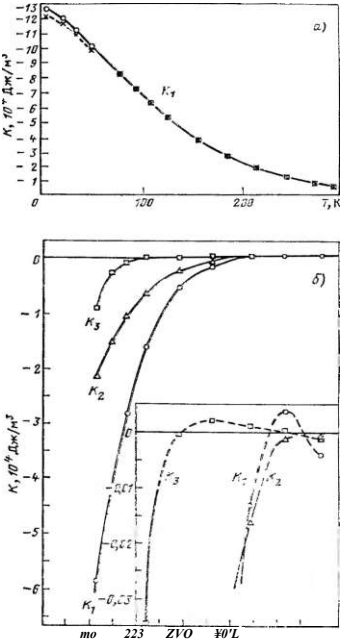


Таблица 27.3. Производная (l/[лло) (d4>/dH)j. для элементов группы железа

Бецес1Во	*m*, к	10-« Тл-'	Литература
Fe	1,5 77 293	4,5 4,5 4,5-6	1102! [102] 177, 102]
р-со, гцк*	4,2 293	4,8 5	[101] [102]
а-Со, ГПУ*	4,2 293	3,2 7,2 6	[101] [110] [39]
Ni	4,2 77 294 377 428 479 568 606	1,2 1,5 1,0 0,5 0,0 —0,7 —3,8 —11,0	[105]

' См. примеч. к *табл.* 27.1.

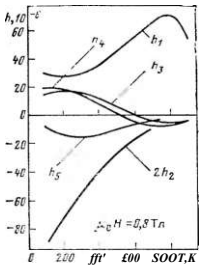


Рис. 27.12. Температурные зависимости констант магнитострикции Fe [109]

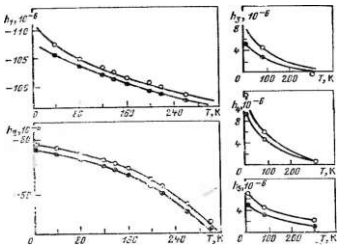


Рис. 27.13. Температурные зависикости констант магни**тострикции** двух **образцов** Ni (чер:1ые и белые кр\жки) [78]

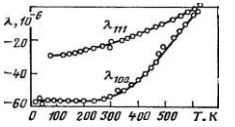


Рис. 27.14. Температурные зависимости магнитострикции

Таблица 27.4. Константы магнитострикции, Ю"". Fe и Ni при комнатной температуре

Элемент	fti	ftj.		*К*	*Ih*	Литература
Fe	36,2	-34,0	2	—	—	[61]
Ni	-94-^ -ь-99	-42-^ 44	-0,7^ -^0,1	-1,4^ -^3,4	0,2^ -1,5	**[36, 78]**

Таблица 27.5. **Константы магнитострикции** а-Со (ГПУ)* **при различных температурах** [70]

m. "С	10-»	>-*в.* 10-°		XD. 10-»
-200	—66	—123	-f126	—128
0	—52	-109	+ 126	-103
20	—50	—107	+ 126	—105
200	-32	—88	+ 120	-82
400	— 16	-70	+ 105	-52
20 [39]	-45	-95	+110	— 100

' См. примеч. к табл. 27.1.

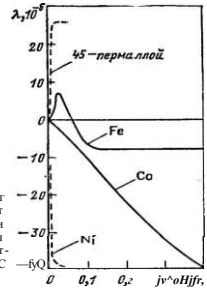


Рис. 27.15. Зависимостг продольной магнитост рикции поликристалли ческих образцов от ин дукции внешнего магнит ного поля при 7" = 20°С —fyQ

27.2.2. Редкоземельные и актиноидные элементы. Ферромагнитное упорядочение в /-металлах чаше реализуеicH в довольно сложны.х магнитных структурах («Конус», «Ферри» на рис. 27.16), переход к которым из парамагнитного состояния (сПара» на рис. 27.16)

осуществляется при понижении температуры, как правило, через антиферромагнитные (АФ) фазы («Спираль», «АФ-конус», «Волна» на рис. 27.16)

Есть сведения о ферромагнитных, метастабильных при комнатной и более низких температурах, кубических фазах Pr, Nrf и Pr [80]. Обнаружен [71] ферромагнетизм кубической гранецентрированной фазы Cm (см. рис. 27.29, 27.30), которая также, видимо, метастабильна при температурах, меньших температуры Кюри.

Данные о магнитных свойствах редкоземельных металлов приведены в табл. 27.6.

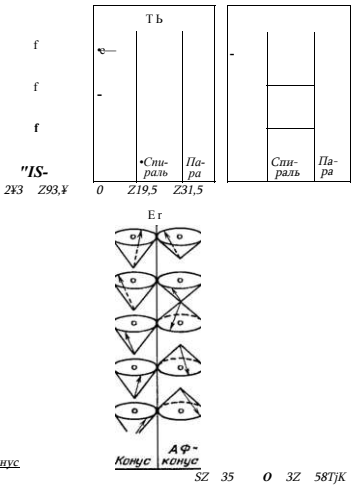


Рис. 27.16. Виды магнитного упорядочения в тяжелых редкоземельных элементах по данным нейтронографии [80]

Таблица **27.6. Магнитные свойства ферро- и ферримагнитных редкоземельных металлов (фаза с пространственной группой Рб^Штс) [80**

Эле-	I^B		Направление оси намагничивания при 7-=0 К	TN. к	Тс- К	. К H\\c	HLc
Gd	7,98	7,63		—	293,4	317	317
Ть	9,77	9,34	*b*	230,0	219,5	195	239
Dy	10,83	10,33	*a*	179,0	89,0	121	169
Ho	11,2	10,34	*b*	132,0	20,0	73,0	88,0
Ег	9,9	9,1		85,0	20,0	61,7	32,5
Тт	7,61	7,14	*c*	58,0	32,0	41,0	—17,0

Температурные и полевые зависимости спонтанного магнитного момента, а также температурные зависимости обратной парамагнитной восприимчивости рассматриваемой группы элементов даны на рис. 27.17—27.30.

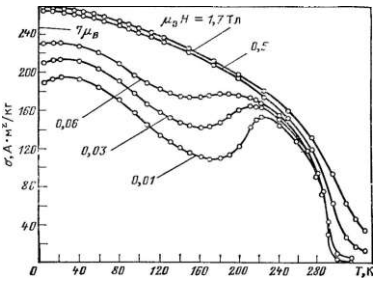


Рис. 27.17. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси с) кристалла Gd при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [92]

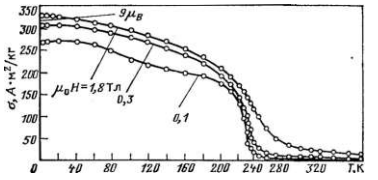


Рис. 27.18. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси Ь) кристалла **Ть** при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [66]

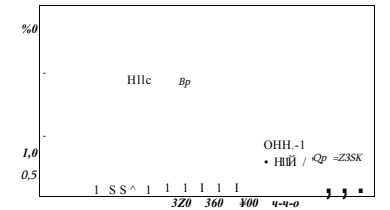


Рис. 27.19. Температурные зависимости обратной удельной парамагнитной восприимчивости (вдоль осей *a, b c)* кристалла ТЬ [62]

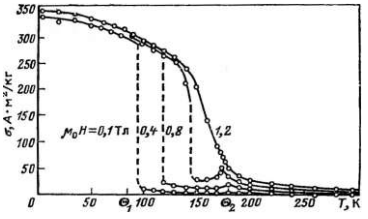


Рис. 27.20. Температурные зависимости удельного магнитного момента монокристалла Dy при различных значениях индукции магнитного поля, приложенного вдоль оси о в базисной плоскости [34]

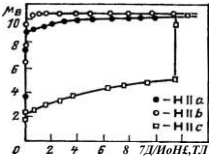


Рис. 27.23. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Но от индукции внутреннего магнитного поля. Внешнее магнитное поле прикладывалось вдоль осей а, Ь и с при температуре 4,2 К [40]

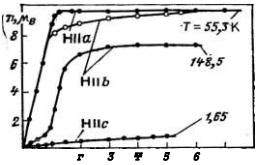


Рис. 27.21. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Dy от индукции внешнего поля [58]

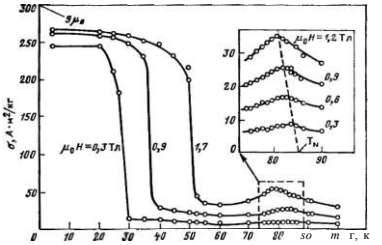


Рис. 27.24. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси с) кристалла Er при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [631

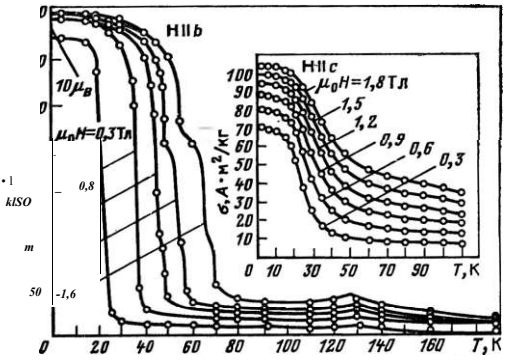


Рис. 27.22. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль осей Ь и с) кристалла Но при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [103]

ft ϕI c ®

^ H«c

9 гг/идн,тл

Рис. 27.25. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Er от индукции магнитного поля, приложенного вдоль осей ***a, b и c,*** при температуре 4,2 К [40]: С—значения п из 197]. умноженные на 0.963 186)

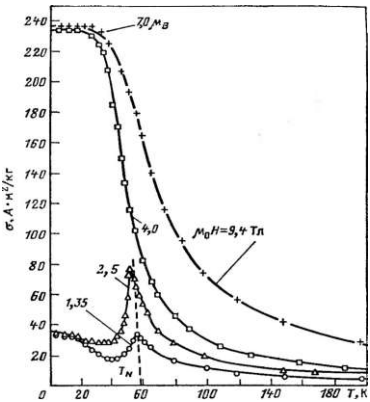


Рис. 27.26. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси с) кристалла Тт [98]

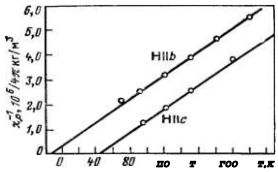


Рис. 27.27. Температурные зависимости обратной удельной восприимчивости в парамагнитной области (вдоль осей ***b*** и с) кристалла Тт [98]

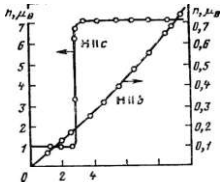


Рис. 27.28. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Тт от индукции внутреннего магнитного поля при 7=4,2 К [98]

0,3

ЭЭ7,1-

Г, К

Рис. 27.29. Температурные зависимости атомного магнитного момента для Cm в гранецентрированной кубической [5-фазе при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [71]

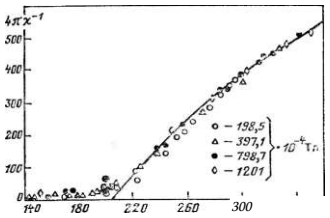


Рис. 27.30. Температурные зависимости обратной объемной парамагнитной восприимчивости Cm в гранецентрированной кубической Р-фазе при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [71]

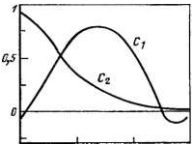


Рис. 27.31. Температурные зависимости констант ***C\= —K\ + K2*** и C2=K2/2 магнитной анизотропии гексагонального кристалла Gd [87]

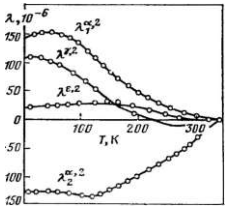
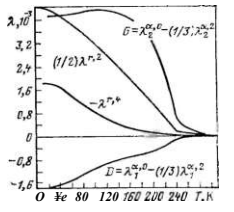


Рис. 27.32. Температурные зависимости констант магнитострикции Gd [88]



Рпс. 27.33. Температурные зависимости констант магнитострикции Tb, экстраполированных к нулевому внешнему полю [96]

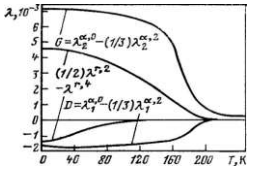


Рис. 27.34. Температурные зависимости констант магнитострикции Dy во внешнем поле с индукцией 3 Тл [95]

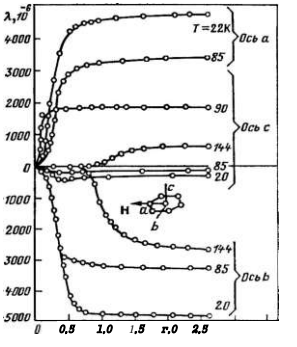


Рис. 27.35. Зависимости магиитострикции вдоль осей монокристалла Dy от индукции магнитного поля, приложенного вдоль оси ***a*** [79]

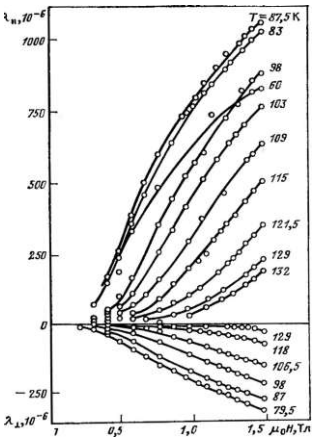


Рис. 27.36. Изотермы продольной Т'п и поперечной Ях магнитострикций поликристаллического гексагонального

Далее приведены характерные температурные зависимости констант анизотропии и магнитострикции для тяжелых редкоземельных элементов (рис. 27.31—27.34) и, наконец, в качестве примера — зависимость магнитострикции от индукции магнитного поля для Dy (рис. 27.35, 27.36).

27.3. СПЛАВЫ

Большинство данных этого параграфа относится к двухкомпонентным системам. Исключение составляют система сплавов Fe—Co—Ni и гейслеровы сплавы.

27.3.1. Сплавы на основе rf-элементов. Эти сплавы дают огромное разнообразие сочетаний магнитных свойств, зависящих, как правило, от механической и термомагнитпой обработки. Это обеспечивает их широкое применение. В этом пункте кроме данных о хорошо изученных и используемых в технике сплавах на основе Fe, Co и Ni (табл. 27.7, 27.8, 27.12 и рис. 27.37—27.54) приведены сведения о гейслеровых сплавах (табл. 27.9), некоторых интерметаллидах (табл. 27.11) и слабых зонных ферромагнетиках (табл. 27.10). В последних малая спонтанная намагниченность (и<|Хв) возникает в результате упорядочения спинов электронов проводимости.

Данные о разбавленных сплавах, обладающих своеобразными ферромагнитными свойствами (см. [89]), не приводятся.

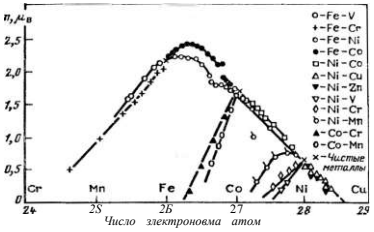


Рис. 27.37. Зависимость атомного магнитного момента сплавов и чистых металлов от среднего числа электронов на атом [3] (кривая Слэтера — Полинга)

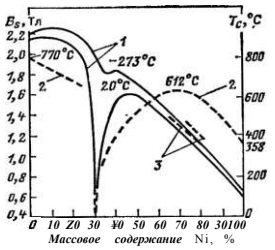


Рис. 27.38. Индукция насыщения (У) температура Кюри *(2)* сплавов Fe—Ni и индукция насыщения упорядоченных сплавов с составом, близким к FeNis (5) [3]

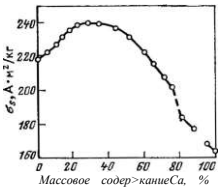


Рис. 27.39. Удельный магнитный момент насыщения сплавов Fe — Co при 7"=20"C [108]

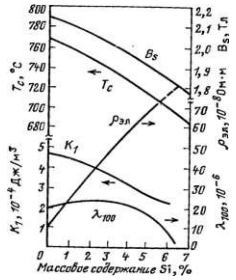


Рис. 27.40. Магнитные свойства и удельное электрическое сопротивление сплавов Fe—Si при Т=20°С [81]

Продолжение табл. **27.7**

Второй компонент	Атомное содержание, %	а^. А . *U^I^T* (Г = 20 "О	*п. V-B*	*Тс. К*
Rh	10,0	209	2,32	
	25,0	192	2,39	987
	40	161	2,26	897
Rii	7,0	200	2,18	933
	12,5	105	1.17	
Sn	2,3	208	2,18	1041
	6,0	197	2,16	1041
Si	8,3	204	2,00	993
	15,9	174	1,67	926
	23,5	141	1,32	860
V	5,9	204	2,09	1088
	10,6	184	1,91	1078
	18,6	149	1,58	1056

Таблица 27.7. Удельный магнитный момент насыщения и температура Кюри бинарных сплавов железа [301

Второй компонент сплава	Атомное содержание, %	А . м^/кг (Г = 20 °С)	*п. IIB*	Гс. К
Al	7,1	207	2,05	1029
	19,7	184	1,74	937
	24,9	134	1,29	714
	26,0	149	1,40	767
Au	6,2	174	2,08	1040
	10,2	154	2,02	1041
Co	20	236	2,42	1223
	33	238	2,52	1243
	50		2,42	1253
	75	203	2,14	1143
	80	184	1,94	1183
Cr	17,7	196	1,70	951
	47,5	90	0,98	756
	67,8	35	0,53	541
Ir	4,0	200	2,25	1023
	15,0	120	1,67	—
oS	8,1	158	1,97	—
	12,5	50	0,69	—
Pd	5,5	203	2,19	1027
	40,0	129	1,89	—
	74,8	45	0,97	523
Pi	8,1	191	2,36	
	12,4	177	2,43	—
	24,8	104	2,23	437
	50,0	32	0,75	—

Таблица 27.8. Удельный магнитный момент насыщения и температура Кюри бинарных сплавов кобальта [30]

Второй компонент сплава	**держание** :'Уо	а А • М^КГ (Г =20 "О	*п. V-B*	*Гс. К*
Cr	5,6	134	1,42	—
	10,6	100	1,07	
	16,7	59,5	0,64	
	22,1	19	0,24	—
Mn	4,2	144	1,53	—
	11,9	109	1,16	
	17,3	84	0,89	—
	22,5	48	0,57	—
ш	40	124	1,38	1173
	70	90	0,97	953

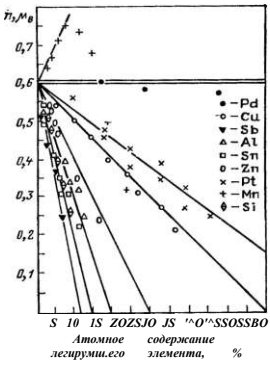


Рис. 27.41. Зависимости атомных магнитных моментов насыщения от состава сплавов Ni с неферромагнитными металлами [3]

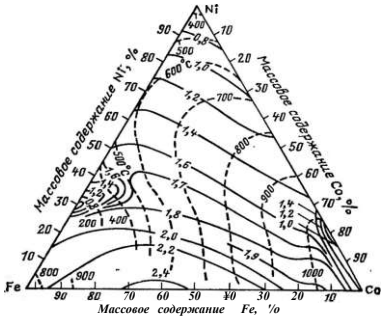


Рис. 27.43. Индукция, соответствующая намагниченности Но/, Тл (сплошные кривые), в поле с Я=1,19-10^ А/м и температура Кюри, °С (пунктир) сплавов Fe—Co—Ni

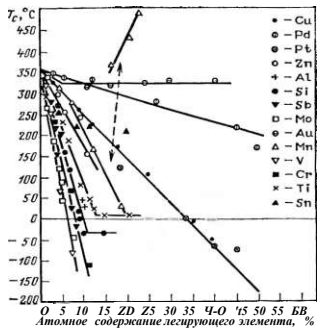


Рис. 27.42. Температуры Кюри сплавов Ni [3]

Таблица 27.9. Температура Кюри и атомные магнитные моменты гейслеровых сплавов (простая кубическая структура CsCl) [106]

Соединение	Тс. К	n. tlB	Соединение	Тс.К	n. l^s
CUaMnAl	**600**	**3,6**	Ni^MnGa	**379**	**4,2**
CuгMIIn	**520**	**4,0**	NijMnln	**323**	**4,4**
CujMnSn	**530**	**4,1**	Ni^MnSn	**344**	**4,1**
Co^MbSi	**982**	**5,1**	Ni^MnSb	**360**	**3,3**
Co^MnGa	**694**	**4,1**	PdaMnGe	**170**	**3,2**
COrMnCe	**905**	**5,1**	PdaMnSn	**189**	**4,2**
CQ^MnSn	**829**	**5,1**	Pd^MnSb	**247**	**4,4**
			AuaMnAl	**258**	**3,1**

Таблица 27.10. Магнитные свойства и кристаллическая структура слабых зонных ферромагнетиков на основе переходных d-элементов [2, 101]

Соданe-	Кристаллическая структура		10^ кг/м»	*Тс. К*	6,. К		*п. V-B*	Литера-тура
	Сингония, пространственная группа	Параметры решетки, им						
ZrZn^	Кубическая ***FdSitn***	0 = 0,739	7,16	16—27	33	1,3—1,4 0,75	0,12—0,18	[83, 85] [93]
Sc3ln	Гексагональная ***P&slmmc***	a = 0,642-^-0,656 c =0,512 4-0,518	4,38	6—7,5	16	0,67—1,3	0,06—0,15 (SO	[60. 84]
АЦИV	Объемноцентрированная тетрагональная структура типа Ni4Mo D\a	a = 0,640 c =0,398		43-55	_	1,4—1,7	0,41—0,92 (V)	[51, 53]
№зА1	Орторомбическая		7,45	41,5—75	130	i,0	0,075—0,1	135)

Таблица 27.11. Атомные магнитные моменты в расчете на атом 3£?-элемента и температуры Кюри некоторых бинарных интерметаллидов [41]

	Сингония (тип кристаллической структуры)		
AuiMn	Объемноцентрированная тетрагональная (Ni4Mo)		4,15
CoB	Орто ромбическая	477	
Co,B	Тетрагональная (CuAla)	429	0,76
CozB	Орторомбическая (РезС)	747	**1,11**
CoPt	Тетрагональная	813	0,17
C0S2	ГЦк"(Ре82)	122—130	0,84-0,96
CrBe,,	Тетрагональная (MoBei,)	50	**-0,2**
CrOer		98	
Cr,,Pt,	ГЦК (CugAu)	>77	-0,47 (Pt)
OS,.,9	Гексагональная (NiAs) '	160 (Г^) 305(Гс)	0,11
CrTe	Гексагональная (NiAs)	239—334	2.45
CrзTe,	Моноклинная	329 (Гс)	2,3
FeAl	Кубическая (CsCi)	623	-1,0
FesAl	ОЦК (сверхрешетка CsCl)	773	1.46 (Fe I) 2,14 (Fe II)
FeB	Орторомбическая		1,12
Fe,B	Тетрагональная	1043	1,91
FeBee	Щк'(МеСи2)	75	-о,1
РезС	Орторомбическая		2,01
FejCr	Гцк (CugAu)		-1,3
FesGe	Гексагональная (NigSn)		1.90
	Орторомбическая	**215**	0,36

Продолжение табл. 27.11

	Сингония (тип кристаллической структуры)	7-С. К	
FeaP	Гексагональная (Fe,P)	**266—278**	0,77—1,32
РезР	Тетрагональная	716	1,84
FePda	ГЦк\сизАи)	540	2,7 (Pe) 0,5 (Pd)
FePt	Тетрагональная (AuCu)	743	**-0,2**
FeRh	Кубическая (CsCI)	330 (Г^) 675 (Гс)	3,0 (Fe) 0.9 (Rh)
FegSi	Кубическая (CUjMnAl)	**808**	1,51 (Fe 1) 2,15 (Fe II)
FegSn	Гексагональная (NigSn)	743	1,9
MnAs	Гексагональная (NiAs)	318 (нагревание) 306 (охлаждение)	3,4
MnB	Орторомбическая	578	1,92
MnBr	Гексагональная (A1B,)	143—157	0,19—0,25
MnBi	Гексагональная (NiAs)	633	3.52
МпзСа	Гексагональная	470	—0,02
МпзСе	Гексагональная (Ni3Sn)	**28**	0,38
МПбСез	Гексагональная (MnsSis)	320	2,5
Mngln			**-0,1**
MnPtj	-Zng., ^ Т^латунь)	<300	3,60 (Mn) 0,17 (Pt)
MnSb	Гексагональная (NiAs)	583	3.53
MnSi	Кубическая (FeSi)		0,4
МПбБпз	Гексагональная (Niln)		1,23
MnsY	Орторомбическая (GdMns)		**2,2**

Продолокение табл. 28.1

Соединение	Сингония (тип кристаллической структуры)	3-е. К	*«. V-B*
Мп2пз	Гексагональная (NisSn)	>400	- 1 , 0
NiPt	Тетрагональная (AuCu)	136	0,06
NigY	Орто ромбическая (CeNig)	33	0,16

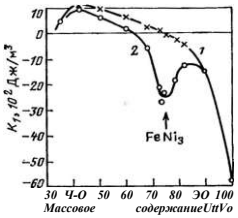


Рис. 27.44. Константа магнитной анизотропии K\ для сплавов Fe—Ni при 7"=20°C:
1 — закаленные, неупорядоченные сплавы; *2* — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы 1381

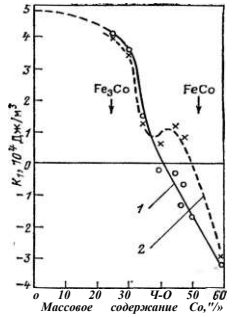


Рис. 27.45. Константы магнитной аиизотропии Ki для сплавов Fe—Co при 7'=20°C:
J — закаленные, упорядоченные сплавы; 2 —медленно охлажупорядоченные сплавы [651

Таблица 27.12. Зависимость констант магнитной анизотропии Ki и Ki, Ю^ Дж/мз, для сплавов Fe—Co—Ni и Co—Ni от температуры 13, 77J

Массовый состав, %			*т* = 20 =С		*Т* = £00 "С		398	
Fe	Co	Ni	*к.*	*К2*	*Ki*		(С.	
50	10	40	61	- 1 6 0	19	4	7	- 6 0
25	25	50	4	16	4	2	- 3	22
20	15	65	9	— п о	- 1	- 1 8	- 3	2
15	25	60	- 2 6	34	- 1 0	- 4 5	- 3	- 1 5
10	40	50	- 7 2	—4	- 5 4	41	- 9	- 1 0 2
10	30	60	- 3 8	- 8 0	- 1 7	- 5 0	- 1 2	- 3 7
10	20	70	- 2 9	17	- 2 5	70	- 1 4	29
10	10	80	- 2	—39	- 2	- 2 0	- 2	6
—	65	35	—258	150	—	—	—	—
	50	50	- 1 0 8	—40				
	40	60	—74	40	—	—	—	—
	20	80	- 4	8				
	10	90	16	—40	—		—	—
—	3	97	- 1 0	9	—	—	—	—

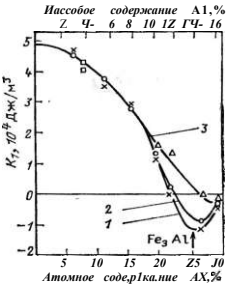


Рис. 27.46. Константы магнитной анизотропии K\ для сплавов Fe—A1 при 7"=20°C:
? —медленно охлажденные, упорядоченные сплавы; ? —час-сплавы; 3 — ные сплавы

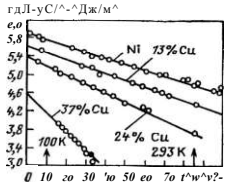
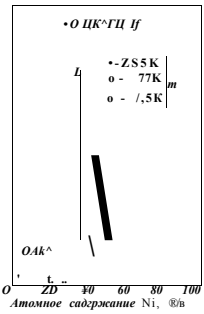


Рис. 27.47. Температурные зависимости константы магнитной анизотропии сплавов ^Ni—Си различного соста-



Производная {да/дЩт для сплавов

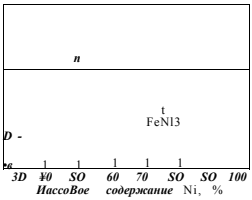


Рис. 27.49. Константы магнитострикции кубических гранецентрированных сплавов Fe—Ni при *Т—20°С:*

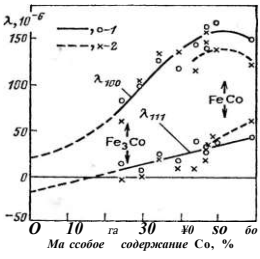


Рис. 27.50. Магнитострикция насыщения вдоль кристаллографических осей [100] и [111] для сплавов Ре—-Со при Г=20°С:

2 — медленно ох-

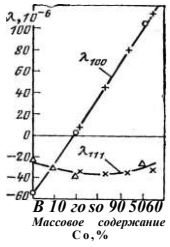


Рис. 27.51. Константы магнитострикции Хюо и Лщ кубических гранецентрированных сплавов Co-Ni при 7.=20°С [45] по данным [64, 111]

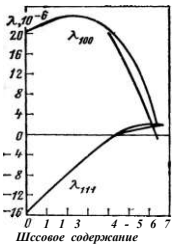


Рис. 27.52. Константы магнитострикции сплавов Fe—Si при Г=20°С:

нижние кривые в области массового содержания Sl 4—77о-зависимости для бо- упорядоченных образцов. охлаждавшихся медленнее [64]

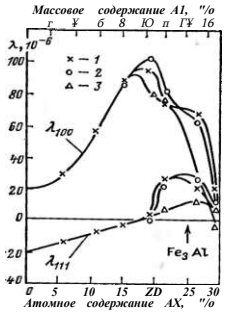


Рис. 27.53. Константы магнитострикции Яюо и Ящ вдоль кристаллографических осей [100] и [111] для сплавов Fe—A1 при Г=20''С:

/ —медленно охлажденные, упорядоченные сплавы; г — охлажденные с промежуточной скоростью, частично упорядоченные 1 — закаленные, неупорядоченные сплавы 164)

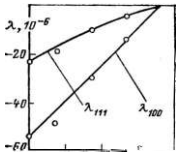


Рис. 27.54. Константы магнитострикции >100 и сплавов Ni—Си при 7"=20°С [77]

27.3.2. Сплавы на основе f-элементов. При всем многообразии сплавов редкоземельных элементов приведены данные только для трех характерных систем интерметаллидов (R — редкоземельный элемент): RFe2, **RCo5** и RzCoiT (табл. 27.13, 27.14 и рис. 27.55—27.68). Материалы иа их основе находят применение в технике. Более полная информация о свойствах этих веществ содержится в [43]. Данные о некоторых ферромагнитных соединениях и сплавах актиноидов приведены в табл. 27.15, 27.16.

Таблица 27.13. **Магнитные моменты насыщения, температуры Кюри и температуры компенсации интерметаллидов (пространственная группа *FdSm)*** [43]

Соединение	«. РВ	*Тс.К*	^комп»
YFe,	2,78-3,1	535—554	—
CeFe,	2,38-2,59	221—240	—
SmFa	2,50-2,8	676-700	—
GdFea	2,8-3,75	785-810	—
TbFej*	3,68-5,8	696-711	—
DyF,	4,9—7,31	633-638	—
HoFe^*	5,1-6,67	597-614	—
ErFej*	4,75-5,85	590-595	480—490
TmFe^	2,52—2,7	566-610	255-248
YbFej	1,8-2,3	—	31
LuFej	2,70—2,97	558—610	—

Ферримагнитная структура.

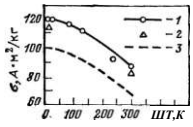


Рис. 27.55. Температурные зависимости удельной намагниченности сплава TbFez [49]:
1 — монокристалл, ось *(111);* 2 — поликристалл в поле с индукцией 12 Тл [49]; 3 — поликристалл (421

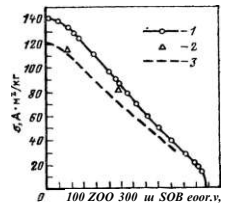


Рис. 27.56. Температурные зависимости удельного магнитного момента сплава DyFe2 [49]:
/ — монокристалл, ось [100]; 2 — поликристалл в поле с индукцией 12 Тл [49]; 3 — поликристалл [42]

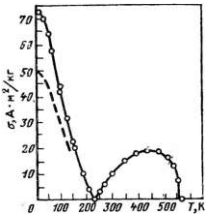


Рис. 27.57. Температурные зависимости удельного магнитного момента сплава TrPer [49]:

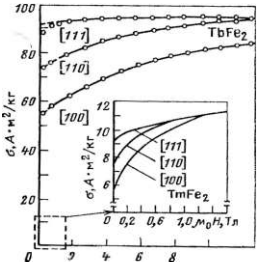


Рис. 27.58. Кривые намагничивания TbPer и TmFcj при Г = 20°С [29, 47]

Таблица 27.14. **Магнитные свойства и постоянные решетки интерметаллидов RC05 (пространственная группа *PBImmm)*** [22, 43]

Соединение		С, НМ	Р, 10> КГ/М^Т	N. I^B	RC. К	^КОМП.
YCOgl	0,4941	0,3971	7,60	6,8-8,2	977—997	-
LaCos	0,5052	0,3970	8,03	7,3	840	—
АСО;'	0,4923	0,4019	8,57	5,7-7,4	737	—
PrCoб	0,5013	0,3988	8,32	9,9-10,0	912	—
NdCo*'	0,5015	0,3982	8,39	9,5-11,7	910	—
SmCos	0,5001	0,3970	8,53	6,0-6,8	1020	—
GdCos	0,4974	0,3971	8,86	1,2—1,5	1008--1020	—
TbCo;2,	0,4951	0,3978	8,91	0,57-0,8	980	99—-120
Dyco;!^	0,4910	0,3996	9,15	0,7-1,5	966	93—
	0,4888	0,4003	9,13	1.1—2,0	1000—-1066	-170 71
ErCOgg	0,4873	0,4003	9,03	0,46-2,1	986-—1123	
TmCog	—	—	—	1,5-1,9	1020	—

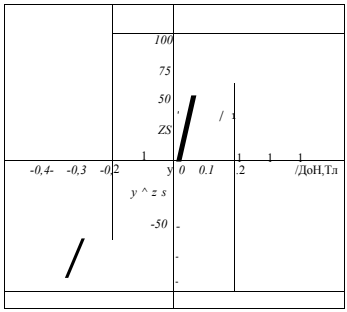


Рис. 27.60. Кривая намагничивания и петля гистерезиса монокристаллического образца SmCos.s, снятые вдоль оси *с* при **Г=20°С** после травления и электрополировки. Амплитудное значение индукции равно 3,0 Тл [19]

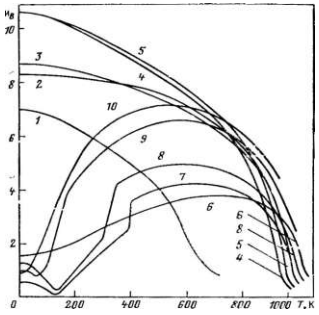


Рис. **27.59.** Температурные зависимости атомных магнитных моментов в расчете на формульную единицу соединений **RCo5:**
;-CeC05: J-vcos: 3-SmCo5; 4 - NciCos. 5 - PTC05, *6-* CdCos; **7-TbCO5,,:** «-OyCoы; **9-HOCO5,E: 1**(?-ErCoe **[21]**

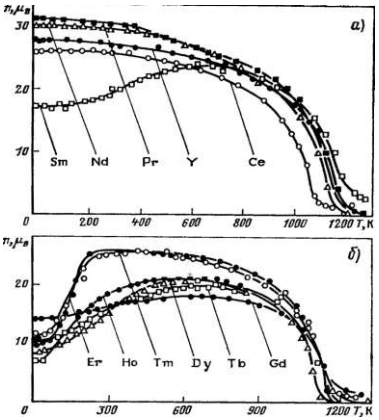


Рис- **27.61.** Температурные зависимости атомных магнит-"^х моментов, приходящихся на формульную единицу соединений R2C017 с легкими лантаноидами и иттрием (о) И С тяжелыми лантаноидами (б). Измерено в поле С индукцией **2** Тл **[76]**

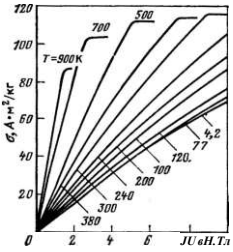


Рис. 27.62. Кривые намагничивания монокристалла SmzCoij в направлении кристаллографической оси [100] при различных температурах *[24]*

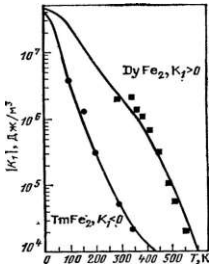


Рис. 27.63. Температурные зависимости абсолютного значения константы магнитной анизотропии K\ для DyFej и TrPer [49]

Таблица 27.15. **Магнитные свойства и постоянные решеткй ферромагнитных монохалькогенидов и монопниктидов актиноидов (пространственная группа *FmSm)*** [107]

Соединение	Постоянная решетки.	*Тс. К*	вр.К		*п. ив*
US	0,5487—0,5490	172—180	173-180	2,22-2,31	1,20-1,76
use	0,571—0,575	160,5—187	188	2,51	1,31-2,0
иTe	0,6146—0,6161	102—110	104	2,84	1,10-2,20
NpN	0,4«98	82—100	82-100	2,13—2,44	1,4—2,2
PuP	0,5651	125	130	1,06	0,42-0,77
PuAs	0,586	129	129	0,97	0,35
PuSb	0,6240	85	90	1,0	0,57
CmN	0,5027—0,5041	109		7,02	–
CmAs	0,5905	88—140	–	6,58	–

Таблица 27.16. **Магнитные свойства и кристаллическая структура некоторых ферромагнитных интерметаллидов актиноидов** (107|

Соединение	Кристаллическая структура		*Тс. К*	V K	*I'D*	*«• 1>-В*
	Сингония, пространственная группа	Параметры решетки, нм				
ThCOs	Гексагональная, ***РЪ/mmm***		410—740			5-8
иС05,з	Ромбоэдрическая, ***НЪт***	С =0,476 с = 3,649	360			2,4
UFe^	Кубическая, ***Fddm***	0,758	160—162	170	2,0-3,0	0,06 (U); 0,59 (Fe); 1,09(2)
UNi2	Гексагональная, ***Pб^/mmc***	с = 0,406 ***с* = 0,825**	30	45	2,5	0,12
UPt	Орторомбическая, ***Cmcm***	**с = 0,372** ***b* = 1,077** ***с* =0,441**	27—30	–	2,62	0,07-0,52
	Кубическая, ***Fd3m***	**0,7144**	492—500	523	4.2	1,09 (Np); 1,35 (Fe); 2,6(S)
NpAU	Кубическая, ***FdSm***	**0,7785**	56	56	2.3	1,5
KlS?	Кубическая ***Fd3m***	**0,7230**	18			0,3-0,4
	Кубическая, ***FdZm***	**0,7098**	28-32	20		1,2
	Кубическая, ***Fd3m***	**0,7528**	7,5-8	-ПО	2I	0,4
	Кубическая, ***Fd3m***	**0,7190**	564—600	599	3,7	0,45(Pu); 1,47 (Fe); 2,3(2)
AmFea	Кубическая, ***Fd3m***	**0,730**	350-400		4	2,8

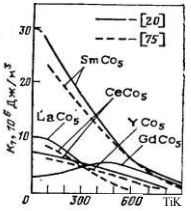


Рис. 27.64. Температурные зависимости константы магнитной анизотропии *K*\ в сплавах RC05 [43]

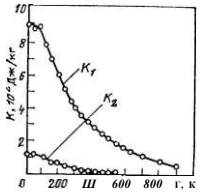


Рис. 27.65. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии в соединении Sm2Coi7 [17]

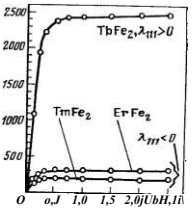


Рис. 27.66. Абсолютное значение константы магнитострикции IXiiil монокристаллов TbFes, ErPes и TmFes при комнатной температуре [29,

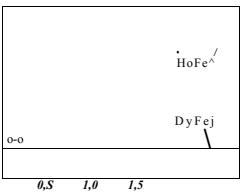


Рис. 27.67. Константа магнитострикции кюо монокристаллов DyFez и HoFe^ при 7=20°C [6O]

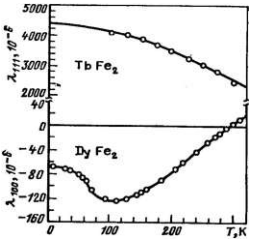


Рис. 27.68. Температурные зависимости констант магнитострикции монокристаллов **TbFej и DyFej [48]**

27.4. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

27.**4.1. Магнитомягкие материалы.** Материалы с наибольшей намагниченностью насыщения. К этой группе материалов принадлежат сорта железа с минимальным количеством примесей (табл. 27.17, 17.18), нелегированные электротехнические стали (табл, 27.19, 27.20), сплавы на основе сйстемы Fe—Co (рис. 27.69—27.72, табл. 27.21, см. также рис. 27.39, 27.45, 27.50, табл. 27.7), в том числе пермеидюр (массовый состав 49% Co, *2%* V, остальное Fe).

Первая цифра в марках железокобальтовых и железоникелевых сплавов **в** табл. 27.21 (см. также табл. 27.31) указывает на процентное содержание (по массе) соответственно кобальта (буква К) и никеля (буква Н), следующая цифра — на содержание легирующего элемента _ хрома (Х), ванадия (Ф), молибдена (М).

Цифры **в** пятизначных марках нелегированиых электротехнических сталей означают: первая — вид обработки давлением и структурное состояние (1 — горячекатаная и кованая, 2 — калиброванная); вторая — содержание кремния (О — сталь нелегированная, без нормирования коэффициента старения; 1 — сталь нелегированная с заданным коэффициентом старения); третья — основную нормируемую характеристику (8 — коэрцитивная сила); четвертая и пятая — значение основной нормируемой характеристики (коэрцитивная сила в целых единицах А/м).

Данные этого параграфа, если не указано другое, соответствуют комнатной температуре, т. е, 20°C,

Таблица 27.17. Химический состав некоторых сортов железа [3]

сорт	Массовое содержание, %							
	C	Si	jl Mll					Al
Кипящая низкоуглеродистая электротехническая сталь (армко) f46]	0,015	0,003	0,030	0,005	0,025	0,15	0,007	0,003
Электролитическое железо	0,01	0,004	0,001	0,003	0,003			0,009
Карбонтьное железо	0,02—0,1	0,04-0,05	0,08—0,1	0,005-0,007	0,005-0,007	0,1-0,6	0,005	

Таблица 27.18. Магнитные свойства некоторых сортов железа высокой чистоты [46]

Сорт	в , Тл	"А	Проницаемость	
			•^гна-,!1	. . . а х
Литое (плавка в вакууме)	-	22-27		17 000—21 ООО
Электролитическое (отжиг)		12-25	44-60	8100-41 500
Электролитическое (плавка в вакууме и отжиг)		7,2	1150	61000
Puron (отжиг в водороде)	2,16	4,0		100000

Таблица 27.19. Магнитные свойства электротехнической нелегированной стали [14]*

Марка	Не . А/м	
10895 20895	95	3,0
10880 20880	80	4,0
10864 20864	64	4,5
10848 20848	48	4,8
20832	32	5,0

* Массовое содержание, %: C < 0,04; S1 < 0,3; Мп < 0,3. /Лагнитная индукция В'fj. Тл, при напряженности магнитного поля Я, А/м, не менее: = 1,38; В.,,,,, = 1,50; = 1,62; **Bsooo = 1.71: Bio ОЮ = 1-81; Bzo ooo** = 2.05.

Таблица 27.20. Магнитные свойства сортовой электротехнической нелегированной стали [9]*

Марка	Яс • А/м	в, Тл, при Н, А/м		
		500	1000	2500
10895 20895 11895 21895	95	1.32	1,45	1,54
10880 20880 11880 21880	80	,.36	1,47	1,57
10864 20864 11864 21864	64	1,40	1,50	1,60

Таблица 27.21. Магнитные свойства холоднокатаных с высокой индукцией технического насыщения [8]

Марка	в, Тл, при н. А/м			P, Вт/кг			нс, А/м	
	400	2500	15 000	^1,5/400	^1,8/40	^2,0/400		
27КХ	—	1,75—1,80	2,05-2,15	80—100	—	—	—	—
49К2ФА	1,8—2,0	2,1—2,2	-	-	25-39	30-55	40—140	5500
49КФ	-	1,9-2,0	2,1—2,2	-	-	-	160	-
49К2Ф	-	-	2,25	-	-	-	160	700 при Я = 0,8 А/м

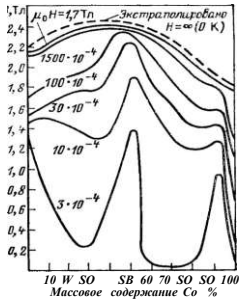


Рис. 27.69. Зависимости магнитной индукции в сплавах Fe—Co от содержания кобальта и индукции внешнего магнитного поля при 7=20°С [3]

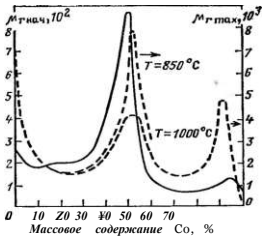


Рис. 27.70. Начальная и максимальная относительные магнитные проницаемости сплавов Fe—Co в зависимости от содержания кобальта и температуры отжига [3J

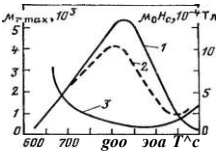


Рис. 27.71. Зависимости максимальной относительной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы пермендюра (массовый состав: 49% Fe, 49% Co, 2% V) от температуры отжига:
1 — Urmax "осле быстрого охлаждения; 2 — Дг^ах ленного охлаждения; 3 - после быстрого охлаждения [3]

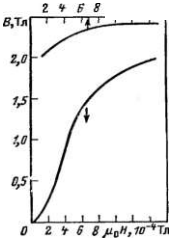


Рис. 27.72. Кривые намагничивания перменлюра (массовый состав:
49% Fe, 49% Co. 1,82% V) [31

Материалы с малыми потерями при перемагничивании. В эту группу материалов входят многочисленные марки железокремнистых электротехнических сталей с массовым содержанием кремния от 0,4 до 5% (табл. 27.22—27.26, см. также рис. 27.40, 27.52 и табл. 27.7); сюда относится также ряд аморфных магнитных материалов (см. ниже).

Здесь приведены кривые намагничивания и зависимости удельных иотерь при перемагничивании от амплитуды перемагничивающего поля для сталей (рис. 27.73—27.79).

Цифры в четырехзначных марках электротехнических сталей означают: первая — вид прокатки и структурное состояние (1 — горячекатаная изотропная, 2— холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой); вторая — массовое содержание кремния, % [О—до 0,4 (нелегированная). 1— от 0,4 до 0,8, 2 — от 0,8 до 1,8, 3 — от 1,8 до 2,8, 4— от 2,8 до 3,8, 5 — от 3,8 до 4,8]; третья — основную нормируемую характеристику (О — удельные потери на ***B=1,7*** Тл, т. е. Pi,7/6o; 1 — удельные потери на частоте перемагничивающего поля 50 Гц при амплитуде те перемагничивающего поля 50 Гц при амплитуде B=1,5 Тл, т. е. Pi.5/5o; 2 — удельные потери на частоте перемагничивающего поля 400 Гц при амплитуде B=1,0 Тл, т. е. Pi,o/**400; 6** — магнитная индукция в слабых магнитных полях при Я=0,4 А/м, т. е. Во,4; 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при Я=10 А/м, т. е. Вю); четвертая — порядковый номер типа стали.

Тип стали определяется первыми тремя цифрами марки.

Таблица 27.22. Магнитные свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной анизотропной стали [15]

Марка	Толщина,	*P*, Вт/кг, не более			*в*, Тл. при *Н*. А/м		
		^-1.0/50	f-l.S/SO	^'1,7/50	100	250	2500
3411	0,50	1,10	2,45	3,20	—	—	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	—	—	1,75
3412	0,50	0,95	2,10	2,80	—	—	1,85
	0,35	0,70	1,50	2,20	—	—	1,85
3413	0,50	0,80	1,75	2,50	—	—	1,85
	0,35	0,60	1,30	1,90	—	—	1,85
	0,30	—	1,19	1,75	—	—	1,85
3414	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88
	0,30	—	1,03	1,50	1,60	1,70	1,88
	0,28	—	1,05	1,55	—	—	1,85
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	1,90
	0,28	—	0,95	1,38	1,61	1,71	1,90
3416	0,28	–	0,89	1,30	1,61	1,70	1,90

Таблица 27.23. Свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной изотропной стали [16]

Марка	Толщина, мм	*р.* Вт/кг, не более		*В*, Тл, при я. А/м				
		1,0/50	^'1,5/50	1000	2500	5000	10 000	130 000
2011	0,65	3,8	9,0	1.48	1,60	1,70	1,80	2,02
	0,50	3,5	8,0	1.49	1,60	1,70	1,80	2,02
2012	0,65	3,6	8,0	1,50	1,62	1,72	1,82	2,02
	0,50	2,9	6,5	1,50	1,62	1,72	1,82	2,02
2013	0,65	3,1	7,0	1.53	1.64	1.74	1,85	2,05
	0,50	2,5	5,6	1.54	1.65	1.75	1,85	2,05
2111	0,65	4,3	10,0	1.45	1,58	1,66	1,75	2,00
	0,50	3,5	8,0	1.46	1,58	1,67	1,78	2,00
2112	0,65	3,5	8,0	1,46	1.59	1.67	1,77	2,02
	0.50	2,C	6,0	1,46	1.60	1.68	1,77	2,02
2211	0,65	3,0	7,0	1,40	1,56	1,65	1,73	1,96
	0,50	2,6	5,8	1,40	1,56	1,65	1,76	2,00
2212	0,65	2,6	6,3	1,42	1,58	1.67	1,77	2,00
	0,50	2,2	5,0	1,42	1,60	1.68	1,77	2,00
2311	0,65	2,5	5,8	1,36	1,52	1,62	1,72	1,96
	0,50	1,9	4,4	1,38	1,54	1,64	1,74	1,96

Продолокение табл. 28.1

\\арка	наГтм	*р.* Вт/кг. ие более		*в*, Тл, приН, А/м				
		1,0/50	^'1,5/50	1000	2500	5000	10 000	130 000
2312	0,65	2,4	5,6	1,38	1,54	1,64	1,72	1,96
	0,50	1,75	4,0	1,40	1,56	1,66	1,74	1,96
2411	0,50	1,6	3,6	1,37	1,49	1,60	1,73	1,96
	0,35	1,3	3,0	1,37	1,50	1,60	1,70	1,95
2412	0,50	1,30	3,1	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95

Таблица 27.24. Свойства тонколистовой электротехнической горячекатаной изотропной стали [10]

Марка	Толщина, мм	*P*, Вт/кг, не более		*в*. Тл, при я, А/м			
		Pi, 0/50	f'1,5/50	1000	2500	5000	looooj 30 000
1211	1,00	5,8	13,4	-	1,53	1.63	1,76	2,00
	0,50	3,3	7,7		1,53	1.64	1,76	2,00
1212	1,00	5,4	12,5	—	1,53		1,76	2,00
	0,65	3,4	8,0		1,50	I!62	1,75	1,98
	0,50	3,1	7,2		1,50	1,62	1,75	1,98
1213	1,00	4.7	10,7	E	1,50	1,62	1,75	1,98
	0,65	3,2	7,5		1,50	1,62	1,75	1,98
	0,50	2.8	6,5		1,50	1,62	1,75	1,98
1311	0,50	2,5	6,1	—	1.48	1,59	1,73	1,95
1312	0,50	2,2	5,3	–	1,48	1,59	1,73	1,95
1313	0,50	2.1	4,6	–	1,48	1,59	1,73	1,95
1411	0,50	2,0	4,4		1,46	1,57	1,72	1,94
	0,35	1,6	3,6	—	1,46	1,57	1,71	1,92
1412	0,50	1,8	3,9	-	1,46	1,57	1,71	1,92
	0,35	1,4	3,2		1,46	1.57	1,71	1,92
1413	0,50	1,55	3,5	–	1,48	1,59	1,73	1,94
	0,35	1,35	3,0		1,48	1,59	1,73	1,94
1511	0,50	1,55	3,5	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
	0,35	1,35	3,0	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
1512	0,50	1,40	3,1	1,29	1,45	1,56		1,89
	0,35	1,20	2,8	1,29	1,45	1,56	К69	1,89
1513	0,50	1,25	2,9	1,29	1,44	1,55	1,69	
	0,35	1,05	2,5	1,29	1,44	1,55	1,69	
1514	0,50	1,15	2,7	1,29	1,44	1,55	1,69	
	0,35	0,90	2,2	1,29	1,44	1,55	1,69	Ь89

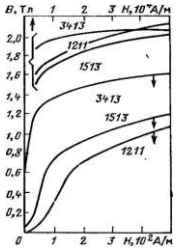


Рис. 27.73. Кривые намагничивания электротехнических сталей разных марок [25]

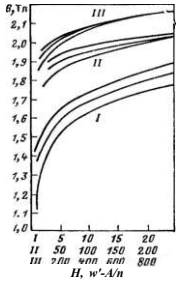


Рис 27.74. Кривые намагничивания электротехнических сталей марок 3411 (нижние), 3412 (средние), 3413 (верхние)

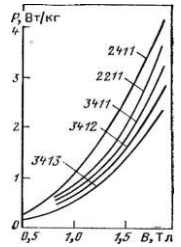


Рис. 27.75. Зависимость удельных потерь от амплитуды перемагничивающего поля при перемагничивании элек. ротехнических сталей разных марок [25]

Таблица 27.25. Магнитные свойства стали марки 1521 [10]

Толщина, мм	P, Вт/кг		в, Тл, при h А/м		
	"о,75/400	^1.0/400	500	1000	2500
0,35	10,7	19	1,21	1,30	1,44
0,22	8,0	14,0	1,20	1,29	1,42
0,2	7,2	12,5	1,20	1,29	1,42
0,1	6	10,5	1,19	1,28	1,40

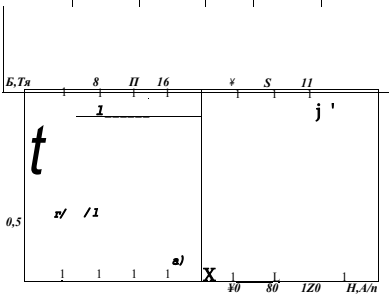


Рис. 27.76. Кривые намагничивания электротехнической стали марки 1521 при толщине образца 0,35 мм (а) и 0,2 мм (б). На частоте перемагничивающего поля 400 Гц *(1)* и 50 Гц *(2)* [25]

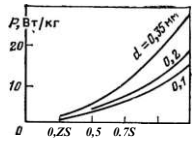


Рис. 27.77. Зависимость удельных потерь при перемагничивании электротехнической стали марки 1521 от амплитуды магнитной индукции при различной толщине

Таблица 27.26. Магнитные свойства ленты холоднокатаной рулонной анизотропной стали [11]

Ларка	Толщина,	*P*, Вт/кг		*H*^, А/м, не более	*в*, Тл, при Я, А/м					
		^1,0/400	"1,5/400		40	80	200	400	1000	2500
3421	**0,20**			**28**	**0,50**	**0,85**	**1,10**	**1,35**	**1,45**	**1,70**
	0,15	**10,0**	**23,0**	**34**	**0,50**	**0,80**	**1,10**	**1,30**	**1,45**	**1,70**
	0,08	**10,0**	**22,0**	**36**	**0,40**	**0,75**	**1,10**	**1,25**	**1,45**	**1,70**
	0,05	**10,0**	**21,0**	**36**	**0,40**	**0,75**	**1,10**	**1,25**	**1,45**	**1,70**
3422	**0,15**	**9,0**	**20,0**	**32**	**0,60**	**0,95**	**1,25**	**1,40**	**1,55**	**1,75**
	0,08	**8,5**	**19,0**	**32**	**0,55**	**0,90**	**1,25**	**1,35**	**1,55**	**1,75**
	0,05	**8,5**	**19,0**	**36**	**0,55**	**0,90**	**1,25**	**1,35**	**1,55**	**1,75**
3423	**0,15**	**8,0**	**19,0**	**26**	**0,80**	**1,10**	**1,40**	**1,55**	**1,65**	**1,82**
	0,08	**7,5**	**17,0**	**28**	**0,80**	**1,05**	**1,40**	**1,50**	**1,65**	**1,82**
	0,05		**17,0**	–	**0,80**	**1,05**	**1,40**	**1,50**	**1,65**	**1,82**
3424	**0,15**	**—**	**18,0**	**—**	**0,80**	**1,10**	**1,40**	**1,55**	**1,65**	**1,82**
	0,08		**16,0**		**0,80**	**1,10**	**1,40**	**1,55**	**1,65**	**1,82**
	0,05	**7,5**	**16,0**	**32**	**0,80**	**1,10**	**1,40**	**1,55**	**1,65**	**1,82**
3425	**0,15**	**—**	**17,0**	**—**	**1,10**	**1,35**	**1,50**	**1,65**	**1,75**	**1,82**
	0,08		**15,0**		**1,05**	**1,30**	**1,50**	**1,65**	**1,75**	**1,82**
	0,05	–	**15,0**	–	**1,05**	**1,30**	**1,50**	**1,65**	**1,75**	**1,82**
		Рхлш	^1,5/400							
3411	**0,20**	**2,2**	**1,5**	**28**	**0,50**	**0,85**	**1,10**	1,35	**1,45**	**1,70**

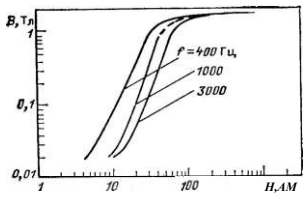


Рис.27.78. Кривые намагничивания ленты из стали марки 3424 толщиной 0,08 мм при различных частотах перемагничивающего поля [25]

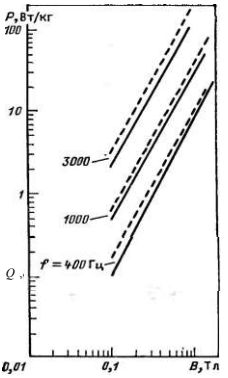


Рис. **27.79.** Зависимости потерь от амплитуды магнитной индукции для ленты из стали марки **3424** при различных частотах перемагничивающего поля:
сплошные линии — толщина ленты 0,08 мм. пунктир — 0,15 мм [251

Материалы **с** наибольшей проницаемостью в слабых полях. Наибольшей проницаемостью в слабых полях обладают некоторые марки электротехнических сталей (табл. 27.27, рис. 27.80) и железоникелевые сплавы, так называемые пермаллои (табл. 27.28, рис. 27.81—27.83, см. также рис. 27.38, 27.44, 27.48, 27.49), а также некоторые аморфные материалы (см. ниже). Подробные данные об этих сплавах можно найти **в** справочнике [28].

Таблица 27.27. Магнитные свойства электротехнических сталей с наибольшей проницаемостью в слабых полях [10] (удельное электрическое сопротивление 6-10-' Ом-м)

Марка	Толщина, мм	μ, Тл, не менее, при Я, А/м							
		0,2		0,4			0,8		
1561	0,35 0.20 0,35 0,20	0,00010 0,00010 0,00012 0,00012		0,00022 0,00023 0,00028 0,00030			0,00065 0,00060 0,00076 0,00075		
Марка	Толщина, мм	10	20	50	70	100	200	500	1000
1571	0,20	0,030	0,10	0,38	0,58	0,66	0,90	1,18	1.29
	0,35	0,035	0,14	0,48	0,61	0,77	0,92	1,21	1.30
1572	0,20	0,040	0,14	0,48	0,62	0,74	0,92	1,20	1.29
	0,35	0.045	0,17	0,57	0,71	0,87	1,02	1,25	1.30

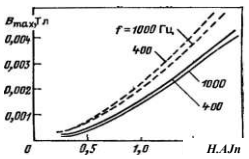


Рис. 27.80. Зависимости максимальной индукции от действующего значения напряженности поля для сталей марок 1561 (пунктир) и 1562 (сплошные кривые) на частотах перемагничивающего поля 400 и 1000 Гц [27]

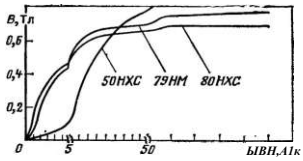


Рис. 27.81. Кривые намагничивания сплавов различных марок [273

Таблица 27.28. Магнитные свойства некоторых железоникелевых сплавов

Марка	Толщина или диаметр.	проницаемость		Я^, А/м	В^. Тл
		^нач	^ max		
45Н	0,02-0,04	1700	16 000	32	
	0,35—2,5	2800	25 000	16	1,5
	3-22	2000	18 000	24	
66НП	0,02—0,04	300—1500	70 000	6,4	
	0,10-0,18	500—2000	200 000	2,8	
	0,35-0,50	500-2000	300 000	2,4	1,3
	0,005	10 000	35 000	6,4	
79НМ	0,1—0,15	22 000	150 000	1,2	
	1,5—2,0	25 000	180 ООО	1,2	
	3—22	20 000	80 000	3,2	1 0,73—0,75
SOНХС	0,02-0,04	1500	15 000	20	
	0,1-0,18	2500	25000	13	1,0
	0,55—1,0	3000	20 000	10	
80НХС	0,005	8000	30 000	8	
	0,1-0,15	22 000	120 000	2,4	
	1,5—2,5	25 000	150 000	1,2	0,63
	3—22	20 000	70 000	3.2	

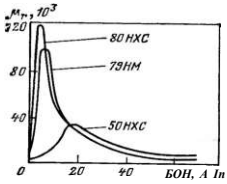


Рис. 27.82. Зависимости относительной магнитной проницаемости от иапряжеииости поля для сплавов различных марок [27]

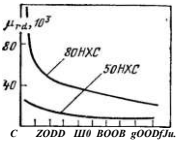


Рис. 27.83. Зависимости относительной магнитной проницаемости от частоты перемагничивающего поля для сплавов различных марок [27]

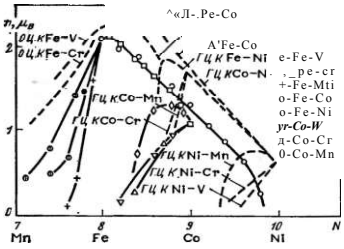
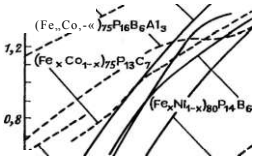


Рис. 27.84. Атомные магнитные моменты (в расчете на атом переходного элемента) квазнбинариых аморфных сплавов Pio **BlO (L, M** —переходные элементы) — сплошные кривые, соединяющие экспериментальные точки:

Л^ —среднее число внешних s- и d-электронов в атомах переходных элементов; пунктир — результаты для соответствующих кристаллических сплавов, не содержащих

Аморфные магнитные материалы. Особую группу магнитомягких материалов образуют аморфные металлические материалы, получаемые с помощью специальных технологий. Известны два типа таких материалов: аморфные сплавы металлов группы железа (см. п. 27.3.1) с добавкой 10—20% (атомное содержание) таких металлоидов, как В, С, N, Si, Р, и аморфные сплавы переходных металлов с редкоземельными. Приводятся данные только о материалах первого типа (табл. 27.29, 27.30), так как они находят применение в качестве материалов с малыми потерями при перемагничивании и большей магнитной проницаемостью в слабых полях (см. выше). Данные о материалах второго типа можно найти в [56]. Результаты, изложенные в этом параграфе, взяты из [82]. Аморфные сплавы отечественного производства описаны в справочнике [28].

На рис. 27.84—27.87 даны графики зависимостей спонтанного магнитного момента и индукции насыщения от состава сплавов и температуры, а также температуры Кюри от состава сплавов. На рис. 27.84 и 27.86 величина ***N,*** отложенная на оси абсцисс, соответствует составу сплавов. Рисунок 27.88 дает представление о ыагнитострикции в материалах разных составов. На рисч 27.89, 27.90 приведены важные для применений характеристики начальной проницаемости и потерь при перемагничивании.



^ ^ (FexNIvxbsBjeBeAls

(FexNVx)78Sl9±lBi3±-l/ \

/(co^Nti-OrePieBeAia

I I I/I I « I •__L

Рис. 27.85. Зависимости индукции насыщения ==20°С от состава аморфных сплавов Fe, Со и

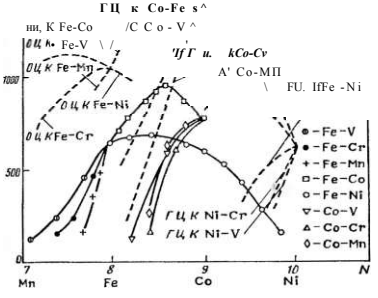


Рис. 27.86. Температуры Кюри квазибинарных аморфных сплавов (**UM**,_48О **РЮ ВЮ (L** и **M** — переходные элементы) в зависимости от среднего числа *N* внешних s- и rf-электроиов атомов переходных элементов — сплошные кривые; пунктирные кривые — данные для кристаллических сплавов, не содержащих Р и В [82]

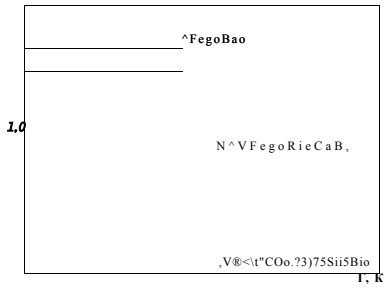


Рис. 27.87. Температурные зависимости индукции насыщения для различных аморфных сплавов (см, табл. 27.29 и 27.30) [82]

Таблица 27.29. **Статические магнитные свойства некоторых аморфных сплавов**

	Отожженные образцы			Неотожженные образ		
				'rl's		
FesoB,.	**0,08**	0,51	100	0,075	0,46	
Fe4oNi4oPi4B6	**0,06**	0,45	58	0,04	0,77	300
	0,010	0,90		**0,02**	0,71	275
	0,05	0,45		0,009		
	0,01	**0,8**		**o,01**	O',71	
Fe,,Ni4A4BeSi2	0,057	0,54	120	0,03P	0,995P	
	0,023	0,45	190	0,011	0,70	310
	0,013	0,36	230	0,013	0,71	340
	0,01	0,35	74	**0,006**	0,63	700
Fe^oPisC,	0,08	0,42	42	0,015	**0,82**	
	0,12	0,42	145	o,o18	0,36	
(Feo,8Nio,2)78SioBi2	0,04	0,44	300	**0,06**	0,4	
(Feo,8Nio.2),8SA4	0,018	0,41	210	0,015	0,93	
(Feo,6N'o,4)78SBBi4	**0,022**	0,44	120	**0,006**	0,95	**2000**
(Feo,4Nio,6)T8SA4	0,024	0,46		**0,006**	0,97	1700
Fe.^1ABi	**0,080**			0,005	0,76	
	0,062		**96**	**0,068**		
				0,050	0,42	

1 e. Вдесь t — тороид. л — j a. Р — образец отожжен под растяжением.

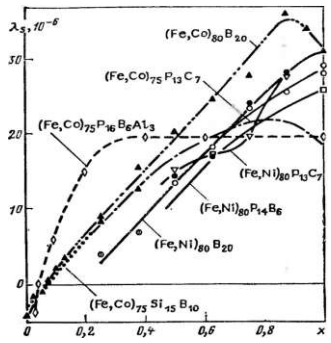


Рис. 27.88. Зависимости магнитострикции насыщения от состава некоторых аморфных сплавов (Fe;cMi_^)7B-8o (P. B, C)25-20 (здесь M—Co или Ni) [82J

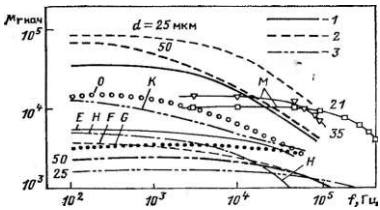


Рис. 27.89. Типичные зависимости относительной начальной магнитной проницаемости от частоты перемагничивающего поля для некоторых аморфных и поликристаллических сплавов при различной толщине образцов: данные для аморфных сплавов помечены буквами, соответствующими табл. 27.30; *1* и 2 —пермаллой (массовый **состав: 4% Mo, 79%** Ni, остальное Fe) и супермаллой (массовый состав: 4% Mo, 80% Ni, остальное Fe, закругленная петля гистерезиса); 5 —силектрон (текстурованная электротехническая сталь, содержащая 3,27о Si по **массе) [82]**

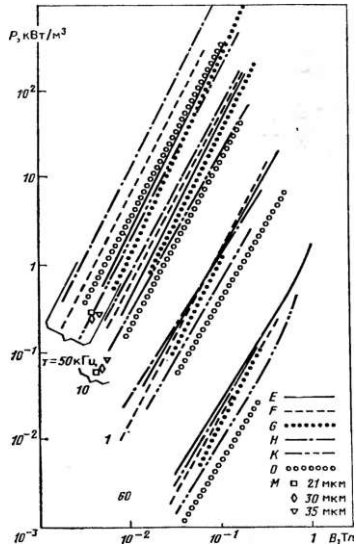


Рис. 27.90. Зависимости удельных потерь от амплитуды **магнитной индукции для некоторых аморфных** сплавов при различных частотах перемагничивающего поля. Буквенные обозначения сплавов соответствуют табл. 27.30. Толщины образцов 25—50 мкм [82]. Кривые около цифры **60** получены при частоте **60** Гц

Таблицг 27.30. Удельные потери при перемагничивании в неотожженных и отожженных образцах аморфных сплавов [82]

Сплав	Обозначе-рис. тгГвэ и 27.90	Ю= ет/м'	Потери при = 0.1Тл, кВт/м= Неотожженные образцы для частот, кГц				Отожженные образцы для частот, кГц				Толщи-М1ш"	Отожженные образцы	
			0,060	I	10	50	0,060		10	50			'rl's
ЕЙЙв.	—	7,39	0,071	2,8	65		0,030	1,1	18		30—35	0,040	0,78
	E	—	0,10	5	350	1000	0,025	1 2	35	200	30	0,075	0,46
	—	7,7		8,5	310			6^3	160		40	0,050	0,42
		7,5—7,7		13	250	Z	—	1,8	42		50	0,019	0,58
	K		0,07	4	400	3000	0,010	0,60	18	180	50	**0,020**	0,70
Fe29Ni4sPl4BeSi2	—	7,51	—	10	160			0,75	20		70	0,011	0,70
Fe4oNi4oB„	F	7,14	0,07	4	450	2300	0,016	1,2	45	600	30	0,090	**0,68**
РемРмВб	G	6,86	0,04	2,5	80	950	0,014	1,1	28	200	25	0,1	0,37
ал^РкВе	и	7,65	0,09	5	380	1700	0,022	1,2	50	1000	30	0,050	0,84
		7,5-7,7	0,06	5,5	550	1300	0,014	0,92	49	820	36	0,035	0,85
\ t i t i :	M	8,0										0,010	0,85
ЙСОЙЙ"А13	0	7^3	0^025	Г	28	190	0^006	0,35	16	230	20	0,015	**0,82**

Материалы со специальными магнитными свойствами и магнитострикционные материалы. Здесь приведены данные о сплавах (табл. 27.31) с повышенным постоянством магнитной проницаемости в слабых полях (ДЛпач неизменна с погрешностью 1—57о в интервале Я от О до 300 А/м), типичные характеристики одного из термомагнитных материалов (рис. 27.91), а также сведения о магнитострикционных материалах (табл. 27.32). В первую из этих групп входят в основном железоникель-кобальтовые сплавы (см. также рис. 27.43 и табл. 27.12), подвергнутые отжигу (перминвар) или термомеханической обработке (изоперм), а во вторую — железоникель-хромовые (компенсатор) (рис. ?7 9П, железоникелевые (термаллой), никель-медные (кальмаллой) сплавы. Сведения об интерметаллидах редкоземельный элемент — железо (перспективных магнитострикционных материалах) содержатся в п. 27.3.2 (см. табл. 27.13, рис. 27.55, 27.58, 27.63, 27.66--27.68). Магнитные материалы со специальными свойствами детально описаны в справочнике [28],

Продолжение табл. 27.31

Марка	Толщина,	•Г нач	•^гнач	tXj^npH //=800 А/м	10-2 "С-» (Г = —60 °С-5- -1-120" С)
64Н	0,01—0,1	2000-2200	1,2	0,07	**0,06**
40НКМ	0,01-0,1	1800	1,2	0,07	–

а н и е. Здесь tx^ ^ коэффициент прямоугольности петли гистерезиса, dn^/dT — температурный коэффициент проницаемости.

Таблица 27.31. **Магнитные свойства холоднокатаной ленты сплавов с низкой остаточной индукцией и повышенным постоянством магнитной проницаемости [8]**

Марка	толщина,	•^гнач	"^гmax •^гнач	Сдi при //=800 А/м	dv-^/dT. (Г = —60 4- 120 °С)
47НК	0,01-0,1	900-1100	1,15	0,05	0,06
47НКХ	0,02-0,1	1500	1,2	0,05	0,03

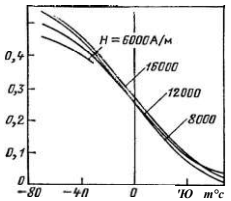


Рис. 27.91. Термомагнитные характеристики сплава марки 32НХ2Ю при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля [28]

Таблица 28.1. Некоторые характеристики магнитных материалов [5]

Основные характеристики механических материалов фрикционных материалов*
(обозначения см. в § 27.1)

Материал и его марка	Химический состав									
Никель НП2Т	Ni более 98%	8,9	2,15	4,9	35	60	1-2	2,3	0,26-0,3	4,2
Сплав NiCo	4";^ Co, остальное	8,9	2,15	4,9	.	55	2	2,7	0,43-0,5	.
Сплав NiCo	2,3% Cr, 1,4% Co, остальное Ni	8,8	2,25	5,0			2,5	2,9	0,37	—
Сплав никоси	4% Co, 2% Si, остальное Ni	8,8	1,9	4,8	210	—	0,4—0,6	1,8	0,49	28
Сплав пермендюр 49КФ	49% Co, 2%V, остальное Fe	8.2	2,05	5,2	200	400	0,4-0,6	2,2	0,48-0,54	27
Сплав 65К	65% Co, остальное Pe	8,2	2,05	5,2	70	500	1-1,7	1,5	0,27-0,30	1
Сплав алфер 14Ю	14% A1, остальное Fe	6,6	1,63	5,0	110	60	0,3-0,6	1,15	0,26	15
Сплав алфер 12 0	12,4% A1, остальное Fe	6,7	1,58	4,8	30	30	0,3-0,6	0,85	0,30	20

Продолжение табл. 27.32

Материал и его марка	Химический состав										
Никель НП2Т	Ni более 98%	750	0,7	1,7	6,1	—37	360	40	1000	3600	1000
Сплав NiCo	4% Co, остальное Ni	—	1,0	—	7,0	-36	410	41	1000		—
Сплав NiCo	2,3% Cr, 1,4% Co, остальное Ni	—	3,0	—	4,8	—33	260	37	—	-	-
Сплав никоси	4% Co, 2% Si, остальное Ni		1,8	0,17—0,25	6,2	(-25)-(-27)	350	26-28		4200	850
Сплав пермендюр 49КФ	49% Co, 2% V, остальное Fe	600	3,4	1,4	24,0	-Ь70	980	80	1100	5000	3500
Сплав 65К	65% Co, остальное Fe	600	0,8	1,0	22,0	+90	980	90	—	6700	4500
Сплав алфер 14Ю	14% A1, остальное Fe	300	12	0,25	12,0	+40	500	34	—	7500	5500
Сплав алфер 12Ю	12,4%A1, остальное Fe	400	16	0,1	16,0	+40	600	34	300	8000	6000

Ссылка на материалы на основе инт металлов приведена перед табл. 27 .31.

27.4.2. Магнитотвердые материалы. Для изготовления постоянных магнитов применяются материалы следующих основных групп: легированные углеродистые стали (табл. **27.33),** характеризующиеся умеренными значениями коэрцитивной силы Ис и максимальной плотности магнитной энергии (BWjmax; железоникель-алюминиевые дисперсионно-твердеющие сплавы (типа альнико. тикоиаль, альни, табл. **27.34),** деформируемые желсаокобальт-хромовые (табл. **27.35)** и железокобальт- (икаллой, рис. 27.92) сплавы, имеющие повышенные значения указанных характеристик; сплавы платила — кооальт (рис. **27.93)** и сплавы на основе интерметаллнда **SmGos** (табл **27.36,** рис. **27.94),** обладающие большими значениями параметров. Есть сообщения о материале с примерным составом NdiBFejrBe [18,991, который имеет еще более высокие характеристики: *Тс*= =585 К, Вг=1,23 Тл, Ясв=880 кА/м, На 960 кА/м, СВЯ)п,ах = 290 кДж/м^. Этот материал образует тетрагональную кристаллическую решетку с периодами о= =0,880 им и с= 1,221 им, его плотность 7,4 *г/см*\

В марках магнитотвердых сплавов буквы и цифры указывают на массовое содержание, %, алюминия (Ю), ванадия (Ф), вольфрама (В), кобальта (К), меди (Д), молибдена (М), никеля (Н), титана (Т). Буква А обозначает наличие кристаллической текстуры, улучшающей свойства сплава. Подробные данные о большинстве из упомянутых в этом пункте материалов приведены в [28].

Таблица 27.33. **Магнитные характеристики (нижние предельные значения) легированных углеродистьк сталей при намагничивании в полях напряженностью //max [6]**

Марка	^max- •'А/"	Н^. А/м	В^. Тл
ЕХ3	39,8	4775	0,95
	39,8	4775	1,00
ЕХ5К5	79,6	7162	0,85
ЕХ9К15М2	79,6	И 937	0,80

Таблица 27.34. **Магнитные характеристики (нижние предельные значения) литых магнитотвердых материалов на основе дисперсионно твердеющих железоникель-алюминиевых сплавов** [7]

Марка	кДж/м=	*Мсв,* кА/м	*В^.* Тл	*BjH* в точке 10-» Тл-м/кА
ЮНД4	7,2	40	0,50	12,0-16,0
ЮНД8	10,2	44	0,60	13,0—16,0
ЮНТС	8,0	58	0,43	7,0—10,0
ЮНДК15	12,0	48	0,75	15,5-18,0
ЮНДК18	19,4	55	0,90	15,0—20,0
ЮНДК18С	28	44	1,10	22,0-28,0
ЮН13ДК24С	36	36	1,30	30,0-33,0
ЮН13ДК24	36	40	1,25	25,0—27,5
ЮН14ДК24	35	48	1,20	20,0-22,0
ЮН15ДК24	36	52	1,15	15,0-17,5
ЮН14ДК24Т2	30	60	1,10	16,0—19,0
ЮН13ДК25А	56	44	1,40	27,5-30,0
ЮН14ДК25А	56	52	1,35	24,0-25,0
ЮН13ДК25БА	56	48	1,40	26,5-27,5
ЮН14ДК25БА	56	58	1,30	21,5—24,0
ЮН15ДК25БА	56	62	1,25	16,5-21,5
ЮНДК31Т3БА	64	92	1,15	11,0—14,0
ЮНДК34Т5	28	92	0,75	8,0-11,0
ЮНДК35Т5Б	32	96	0,75	8,0-10,0
ЮНДК35Т5	36	по	0,75	7,0—8,0
ЮНДК35Т5БА	72	по	1,02	8,0—9,0
ЮНДК35Т5АА	80	115	1,05	8,0-9,0
ЮНДК38Т7	36	135	0,75	4,5-5,5
ЮНДК40Т8	36	145	0,70	3,5-4,5
ЮНДК40Т8АА	64	145	0,90	4,0-5,0

Таблица 27.35. **Магнитные характеристики (нижние предельные значения) магнитотвердых материалов на основе деформируемых железокобальт-хромовых сплавов** [13]

Марка*		Hf^, kAMS	в^. Тл
28Х10К	7	20	0,8
38Х10КА	26	38	1,1
25Х15К	10	24	0,9
25Х15КА	32	40	1,2
23Х15К5ФА	36	42	1,25
20Х23К	12	50	0,75
30Х23КА	30	55	1,00

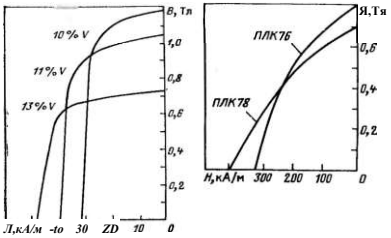


Рис. 27.92. Кривые размагничивания железокобальт-ванадиевого сплава викаллой 52КФ для различного содержания ванадия [27]

Рис. 27.93. Кривые размагничивания платинокобальтовых сплавов [27]

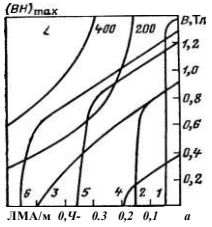


Рис. 27.94. Кривые размагничивания и кривые равных значений максимальной плотности магнитной энергии *(ВН)шах* для различных магнитотвердых материалов: ; - ЮН13ДК25БА; 2 - ЮНДК40Т8АА; 3 - КСП37А; 4 - бариевый феррит; 5 и 6 — SmCo5 Zr(co Cu)7 Fe(Cu Cu)i? спеченный и литой соответственно [25]

Таблица 27.36. **Основные магнитные характеристики (нижние предельные значения) материалов на основе интерметаллида SmCos [12]**

Марка	В,, тл	Н^в. кА/м	2 кДж/м^	Ны. кА/м
КС37	0,77	540	55	1300
КС37А	0,82	560	65	1000
КСП37	0,85	520	65	800
КСП37А	0,90	500	73	640

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов К. П., Левитин Р. З., Никитин С. А., Педько А. В.//Журн. эксперим. и теорет. **физ.** 1961. Т. 40. № 6. С. 1562—1569.

2. Бердышев А. А. Введение в квантовую теорию ферромагнетизма: Курс лекций. Ч. 4. Свердловск: Изд-во Уральского гос. ун-та, 1971.

3. Бозорт Р. Ферромагнетизм: Пер. с англ./Под ред **Е.** И. Кондорского, Б. Г. Лившица. М,- Изд-во иностр. лит., 1956.

4. Боксовский С. В. Магнетизм. М.: Наука, **1971**

5. Голямина И. П. Магнитострикционные материалы/ Ультразвук. Маленькая энциклопедия/Под ред. И. П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. С, 194—195.

6. ГОСТ 6862-71. Прутки из легированной магнитотвердой стали. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1971.

7. ГОСТ 17809-72. Материалы магнитотвердые литые. Марки и технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1972.

8. ГОСТ **10160-75.** Сплавы прецизионные магнитномягкие. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1975.

9. ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электротехническая нелегированиая. М.: Изд-во стандартов, 1975.

10. ГОСТ 21427.3-75. Сталь электротехническая горячекатаная тонколистовая. М.: Изд-во стандартов, 1975.

11. ГОСТ 21427.4-78. Лента стальная электротехническая холоднокатаная анизотропная. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1978

12. ГОСТ 21559-76. Материалы магнитотвердые спеченные Марки, технические требования и методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1976.

13. ГОСТ 24897-81. Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки, технические требования и методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1981.

14. ГОСТ 3836-83. Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1983.

15. ГОСТ 214271-83. Сталь электротехническая **холоднокатаная** анизотропная тонколистовая. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1983.

16. ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1983.

17. Дерягин А. В., Кудреватых Н. В., Башков Ю. Ф./ Труды Международной конференции по магнетизму МКМ-73. М.: Наука, 1974. Т. 1. Ч. 2. С. 222—225.

18. Дерягин А. В., Тарасов Е. Н., Андреев А. В. и др.//Письма в ЖЭТФ. 1984. **Т.** 39, № 11. С. 516—519.

19. Ермоленко А. С., Королев А. В.//Физика металлов и металловедение. 1973. Т. 36, № 1. С. 52—59.

20. Ермоленко **А.** С.//Труды Международной конференции по магнетизму МКМ-73. М,- Наука, 1974. Т. 1. Ч. 1. С. 231—236.

21. Ермоленко А. С. Магнитные свойства монокристаллов редкоземельных соединений со структурой типа $CaCu_5$//Физические свойства магнитных материалов. Свердловск: УИЦ АН СССР, 1982. С. 32—38.

22. Ермоленко А. С Магнетизм высокоанизотропных редкоземельных соединений типа RC05: Дис. на соиск. **учен. степ, д-ра физ.-мат. Н^ЬК Свердловск: Ин-т физ**ики металлов АН СССР, 1983.

23. Кондорский Е. **И.,** Седов **В.** Л.///Журн. эксперим и теорет. физ. 1960. Т. 38, № 3. С. 773—779.

24. Кудреватых Н. В. Магнитные свойства **и** магнитная анизотропия некоторых интерметаллических соединений редкоземельных металлов с металлами группы железа типа R2T17: Дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук. Свердловск: Уральский гос. ун-т, 1977.

25. **Мишин Д. Д.** Магнитные материалы. М.: Высшая школа, 1981.

26. **Рыков** Г. **А.** Металлы, сплавы и металлические изделия//Электротехнические материалы: Справочник. М., Энергоатомиздат, 1983. С. 286—447.

27. **Сергеев В.** Г. Магнитные материалы//Электротехнический справочник/Под ред. В. Г. Герасимова и др. М.: Энергия, 1980. Т. 1. С. 439—463.

28. **Прецизионные** сплавы: Справочник/Под ред. Б. В. Молотилова. М.: Металлургия^ 1983.

29. **Abbundi R.,** Clark **A. E.//J.** Appl. Phys. 1978. Vol. 49. N« 3. (pt. 2). P. 1969—1971.

30. American Institute of Physics Handbook/Ed. by D. E. Gray. N. Y.: McGraw Hill, 1963.

31. Arajs S., Colvin R. V.//J. Phys. Chem. Solids. 1963. Vol 24, N« 10. P. 1233—1237.

32. **Aubert G**.//J. Appl Phys. 1968. Vol. 39. N" **2** (pt 1). P. 504—510.

33. **Barnier Y., Pauthenet R., Riniet G**.//Compt. rend. Acad. sci. 1961. Vol 252, N« 19. P. 2839—2841.

34. Elliott J. F., Legvold S., Spedding F.//Phys. Rev. 1958. Vol. 94, N" 5 P. 1143—1145.

35. **De Boer F. R., Biesterbos J., Schinkel C. J**.//Phvs. Lett. 1967. Vol. 24A, No 7. P. 355—357.

36. **Bower D. 1**.//РГОС. Roy. Soc. 1971 Vol. A326, N« 1564. P. 87—96

37 **Bozorth R. M**.//J Appl. Phys. 1937- Vol. 8, N" 9. P. 575-588.

38. **Bozorth R.** ***M.IIRev.*** Mod. Phys. 1953. Vol. **25,** N« 1. P. 42—48.

39. Bozorth **R. M**.//Phys. Rev. 1954. Vol. 96, № 2. P. 311—316.

40. Bozorth R. M., Clark A. E., Van Vleck J. H.// Intern. J. Magnetism. 1972. Vol. 2, № 1. P. 19—22.

41. **Bozorth R. M., McGuire T. R., Hudson R. P**.//American Institute of Physics Handbook/Ed. by. D. E. Grey. N. Y.: McGraw Hill. 1972. P. 5-139—5-311.

42. **Burzo E.//Z.** Angew. Phys. 1971. Bd. 32. S. 127-130.

43. Buschow K. H. J.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Cotp. 1980. Vol. 1. P. 297—414.

44. **Cable J.** W., **Wollan** E. 0.//Phys. Rev. Vol. 165, N« 2. P. 733—734.

45. Carr W. **J**.//Handbook der Physik/Ed. by. S. Fluge. Berlin: Springer-Verlag, 1966. Bd. 18/2. S. 100-200.

46. Chin G. Y., Wernick J. H.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Cotp., 1980. Vol. 2. P. 55—188.

47. **Clark A. E., Cullen J.,** Sato **K**.//AIP Conf Proc. 1975, № 24. N. Y.: Amer. Inst. Phys., P. 192—195.

48. Clark **A. E., Abbundi R.,** Savage **H. T.,** McMasters **O. D**.//Physica. 1977. Vol. 86-88B, pt 1, P. 73-74.

49. **Clark A. E., Abbundi R., Gillinor W. G**.//1EEE Trans. Mag. 1978. **Vol.** MAG-14 P. 542—545.

50. Clark **A. E**.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Cotp., 1980. Vol. 1. P. 531—589.

51. **Cohen R. L., Sherwood R. C., Wernick J. H**.//Phys. Lett. 1968. Vol. 26A, № 10. P. 462—463.

52. **Corner W. D., Tanner B. K**.//J. Phys. 1976. Vol. C9, N« 4. P. 627—633.

53. **Creveling L., Luo H. L., Knapp G. S**.//Phys. Rev. Lett. 1967. **Vol.** 18, N" 20. P. 851—852.

54. **Cullity B. D.** Introduction to Magnetic Materials. Reding: Addison-Wesley. 1972.

55. **Danan H., Herr A., Meyer A. J. P**.//J. Appl. Phys. 1968 Vol. 39, № 2, pt 1. P. 669—670.

56. **Eschenfelder A. H**.//Ferromagnetic Materials/ Ed by E. P. Wohlfarth. Amsterdam. North-Holland Publ. Com., 1980, Vol. 2. P 345—380.

57. **Escudier P.** Ph. D. Thesis. Grenoble **Univ.** 1973.

|см. в [110]); Franse J. J. M., de Vries G.//Physica. 1968. Vol. 39, N" 4. P. 477—498.
Sa Feron J. L., Hug G., Pauthenet R.//Z. Angew. Phys. 1970. Bd. 30, N« 1. S. 61—64; Les Elements des Terres Rares. Paris: CNRS, 1970. Vol. 2. P. 19—29.
59. Ferromagnetic materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. .tosterdam: North-Holland, Publ. Сотр., 1980. Vol. 1, 2.
60 Gardner W. E., Smith T. F., Hewlett B. W. e. a.// Plivs. Rev. 1968. Vol. 166, № 2. P. 577—588.
' 61. Gersdorf R. Ph. D. Thesis Amsterdam Univ., 1961 (См в [110])
62. Graham C. D., Jr.//Phys. Rev. 1958. Vol. 112 NM. P. 1117- 1120.
63. Green R. W., Legvold S., Spedding F. H.//Ibid !961. Vol. 122, N" 3. P. 827- 830.
54. Hall R. C.//J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30, N" 6 P. 816-819.
65. Hall R. C./7Trans. Metallurg. Soc. AIME. 1960. Vol. 218. P. 268—271.
66. Hegland D. E., Legvold S., Spedding F. H.//Phys. Rev. 1963. Vol. 131, № 1. P. 158—162.
67. Honda K., Kaya S.//Sci. Repts Tohoku Univ. 1926. Vol. 15. P. 721—724
68. Honda K., Masumoto H., Kaya S.//Ibid. 1928. Vol. 17. P. 111—114.
69. Honda K., Masumoto H.//Ibid. 1931. Vol. 20 P. 322-325.
70. Hubert A., Unger W., Kranz J.//Z. Phys. 1969 Bd.224, N« 1—3. S. 148—155.
71. Huray P. G., Nave S. E., Peterson J. R., Haire R. G.//Physica 1980. Vol. 102B, N« 1—3. P. 217—220
72. Kase T.//Sci. Repts Tohoku Univ. 1927. Vol. 16. P. 491—494.
73. Kaya S.//Ibid. 1928. Vol. 17. P. 639—642.
74. Kaya S.//Ibid. 1928. Vol. 17. P. 1157—1160.
75. Klein H. P., Menth A., Perkins R. S.//Physica. 1975. Vol. 808, N» 1—4. P. 153—163.
76. Laforest J., Lemaire R., Pauthene R., Schweizer J.// Compt. rend. Acad. sci. 1966. Vol. B262, N" 19. P. 1260-1263.
77. Landolt-Bornstein. Zahlenwerte and Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Technik. Berlin: Springer-Verlag. 1962. Bd. 2. Teil 9.
78. Lee E. W., Asgar M. A.//Proc. Roy. Soc. 1971. Vol. A326, N" 1564. P. 73—85.
79. Legvold S., Alstad J., Rhyne J.//Phys. Rev. Lett. 1963. Vol. 10, N« 12. P. 509—511.
80. Legvold S. Rare Earth Metals and Alloys//Ferromagnetic Materials//Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Сотр., 1980. Vol. 1. P. 183—295.
81. Littman M. F.//IEEE Trans. Mag. 1971. Vol. MAG-7. P. 48—51.
82. Luborsky P. E.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E P. Ufohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Сотр., 1980. Vol. 1. P. 451—530. (См. также Хандрих К., Кобе С. Аморфные ферро- и ферримагнетики: Пер. с нем. М.: Мир, 1982.)
83. Mattias B. T., Bozorth R. M.//Phys. Rev. 1958. Vol. 169. P. 604—605.
84. Mattias B. T., Clogston A. M., Williams H. J. e. a.// Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 7, No 1. P. 7—9.
85. Mattocks P. G., Melville D.//J. Phys. F: Metal Phys. 1978. Vol. 8, № 6. P. 1291—1302.
86. McEwen K. A.//Handbook of the Physics and Chemistry of Rare Earth/Eds. K. A. Gschneider, L. Eyring. Amsterdam: North-Holland Publ. Сотр., 1978. Ch. 6.
87. Mihai v., Franse J. J. M.//Rev. Roum. Phys. 1976. Vol. 21. P. 1041—1044.
88. Mishima A., Fuju H., Okamoto T.//J. Phys. Soc. Jap. 1976. Vol. 40, No 4. P. 962—967.
89. Mydosh J. A., Nieuwenhuys G. J.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Сотр., 1980. VoL 1. P. 71—182.
90. Myers H. P., Sucksmith W.//Proc. Roy. Soc. 1951. Vol. A207, N^ 1091. P. 427—446.
91. Nakagawa Y.//J. Phys. Soc. Jap 1956. Vol. 11, No 8. P. 855—863.
92. Nigh H. E., Legvold S., Spedding F. H.//Phys. Rev. 1963. Vol. 132. No 3. P. 1092—1097.
93. Ogawa S., Sakamoto N.//J. Phys. Soc. Jap. 1967. Vol. 22. No 5. P. 1214—1221
94.Pauthenet R.//High Field Magnetism/Ed. by M. Date. Amsterdam: North-Holland Publ Сотр., 1983 P. 77—86.
95. Rhyne J. J. Ph. D. thesis. Iowa State Univ. Ames, Iowa. 1965 (См. в [80]).
96. Rhyne J. J., Legvold S.//Phys. Rev. 1965. Vol. 138A, N« 1. P. 507—514.
97. Rhyne J. J., Foner S., McNiff E. J., Jr., Dodo R.// J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39, No 2. pt 2. P. 892—893.
98. Richards D. B., Legvold S.//Phys. Rev. 1969. Vol. 186, No 2. P. 508—514.
99. Sagawa M., Fujimura S., Togawa N. e. a.//J. Appl. Phys. 1984. Vol. 55, N« 6, pt 2A. P. 2083—2087.
100. Sato H., Chandrasekhar B. S.//J. Phys. Chem. Solids, 1957. Vol. 1, No 4. P. 228—233.
101. Shimizu M.//Rep. Prog. Phys. 1981. Vol. 44. P. 329—409.
102. Stoelinga J. H. M., Gersdorf R., de Vries G.// Physica. 1965. Vol. 31, No 3. P. 349—361.
103. Strandburg D. L., Legvold S., Spedding F. H.// Phys. Rev. 1962. Vol. 127, No 6. P. 2046—2051.
104. Sucksmith W., Thompson J. E.//Proc. Roy. Soc. 1954. Vol. A225, No 1162. P. 362—375.
105. Tange H., Tokunaga T.//J. Phys. Soc. Jap. 1969. Vol. 27, No 3. P. 554—560.
106. Tebble R. S., Craik D. J. Magnetic Materials. Lond.: Wiley Intersci., 1969.
107. Trzebiatowski W.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland PubL Сотр., 1980. Vol. 1. P. 415—450.
108. Weiss P., Forrer R.//Ann. Phys. 1929. Vol. 12. P. 279—281.
109. Williams G. M., Pavlovic A. S.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39, No 2, pt. 1. P. 571—
110. Wohlfarth E. P.//Ferromagnetic. Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Сотр., 1980. VOL L P. 1—70.
111. Yamamoto M., Nakamichi T.//J. Phys. Soc. Jap. 1958. VoL 13, N« 2. P. 228—229.

Глава 28

АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

В. И. Ожогин, В. Г. Шапиро

28.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Обменное взаимодействие, обусловливающее упорядоченную магнитную структуру вещества, может приводить как к параллельной, так и к аитипараллельиой (а то и к более сложной) взаимной ориентации магнитных моментов соседних атомов в кристаллах. Вещества, в которых происходит полная (или почти полная) компенсация моментов отдельных ионов, называются ***антиферромагнетиками.*** Сведения о магнитной структуре и свойствах антиферромагнетиков можно найти в монографиях [1—16] и справочнике [17]. Экспериментальные данные по магнитным свойствам антиферромагнетиков, как правило. хорошо объясняются, если представить их магнитную структуру как суперпозицию двух (или более) вставленных одна в другую подрешеток, в каждой из которых магнитные моменты атомов параллельны друг другу. В настоящее время известно большое число различных неколлинеарных магнитных структур, в частности геликоидальные (например, MnOj, MnAus), синусоидально-модулированные (типа CeAlj) и другие, у которых компенсация магнитного момента может иметь место по довольно обширному, почти макроскопическому объему кристалла. Эти соединения обычно также относят к антиферромагнетикам. Более подробно о различных неколлинеарных магнитных структурах написано в монографии [12] и обзоре [18].

28.2. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГКООСНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ MnFs)

Простейшим двухподрешеточным антиферромагнетиком, свойства которого в настоящее время изучены наиболее детально, является МпРг (рис. 28.1). Магнит-

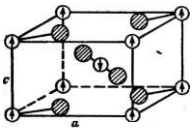


Рис. 28.1. Магнитная структура МпРг при $T<T_N$ [16]

ная восприимчивость выше температуры магнитного упорядочивания — точки Нееля (Tti) подчиняется закону Кюри—Вейса: x=CI(T—Q) (6 в антиферромагнетиках обычно отрицательна), ниже точки Нееля поIзедение магнитной восприимчивости зависит от направления внешнего магнитного поля относительно осей кристалла. Одноосные кристаллы, т. **е.** кристаллы, имеющие одно выделенное направление (ось), обычно характеризуются магнитной восприимчивостью Хц в поле, параллельном оси, и X X в поле, перпендикулярном оси. Если эта ось «легкая», т. **е.** именно вдоль нее в положении равновесия ориентированы магнитные моменты подрешеток (как в МпРг), то при Г=7"зг магнитная восприимчивость Ху имеет максимум (рис. 28.2). Около точки Нееля имеется также четкий максимум на кривой зависимости удельной теплоемкости от температуры (рис. 28.3). Безусловным критерием существования антиферромагнитного упорядочения могут служить лишь результаты экспериментов по дифракции нейтронов, однако наличие аномалий в температурных зависимостях магнитной восприимчивости и теплоемкости позволяет предполагать (с дос-

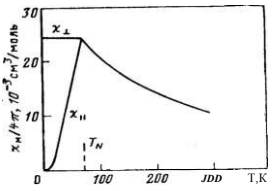


Рис. 28.2. Зависимость восприимчивостей X j, и / монокристалла МпРг от температуры [19]

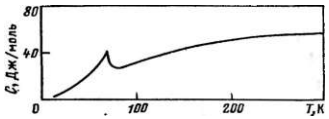


Рис. 28.3. Зависимость удельной теплоемкости МпРг от температуры [20]

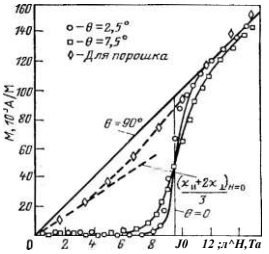


Рис. 28.4. Зависимость намагниченности М монокристалла МпРг при 7=4,2 К от напряженности магнитного поля, ориентированного вдоль легкой оси (6=0) и отклоненного от нее на небольшие углы:

приближении теории молекулярно-

таточно большой вероятностью) существование в кристалле антиферромагнигиого упорядочения

На кривой намагничивания в поле, параллельном легкой оси (рис. 28.4), при (io//c=9,3 Тл наблюдается резкий скачок, соответствующий фазовому переходу

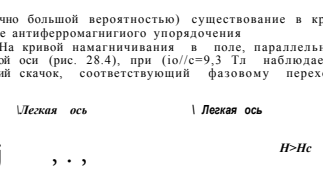
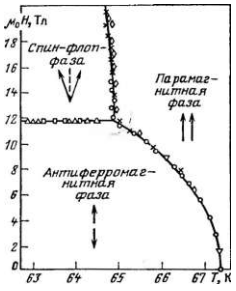


Рис. 28.5. Опрокидывание подрешеток в одноосном антиферромагнетике в магнитном поле, параллельном легкой



Магнитная фазовая диаграмма MnPr в магнит-, параллельном легкой оси [001] [22]:

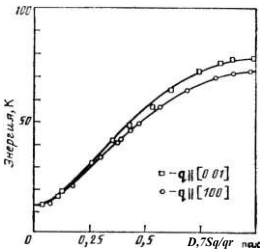


Рис. 28.7. Спектр магионов в MnPr при 7=4,2 К [23]: дисперсионные кривые определены из неупругого рассеяния нейтронов для двух направлений волнового вектора q

первого рода между двумя состояниями магнитной структуры. В этом поле происходит опрокидывание магнитных подрешеток — спин-флоп (spin-Пор) (рис. 28.5). Фазовая диаграмма простого легкоосного антиферромагнетика в 7"//-плоскости (рис. 28.6) состоит из трех фаз: парамагнитной, антиферромагнитной и фазы с опрокинутыми подрешетками (спин-флоп-фазы).

Спектр магнонов (спиновых волн) имеет щель (рис. 28.7), которая определяет частоту «о антиферромагнитного резонанса (АФМР). В приближении теории молекулярного поля WQ^Y] ^ *a* ' ^ ^ *e* — ^^

к *Ha* — эффективные поля обмена и анизотропии, Н — напряженность внешнего магнитного поля, параллельного легкой оси. Температурная зависимость частоты АФМР обусловлена температурной зависимостью полей *Ha* И *He* (рис. 28.8).

В оптических и инфракрасных спектрах антиферромагнетиков имеются особенности, обусловленные магнитным упорядочением и участием магнонов в поглощении (или рассеянии) электромагнитных волн. (Вопросы спектроскопии антиферромагнетиков освещены в [4, 7, 25].) Электродипольное поглощение в длинноволновой инфракрасной области, связанное с одновременным рождением двух магнонов (двухмагнонное поглощение), иллюстрирует рис. 28.9. Особенностью оптических спектров поглощения антиферромагиитных диэлектриков является наличие дополнительных полос поглощения.

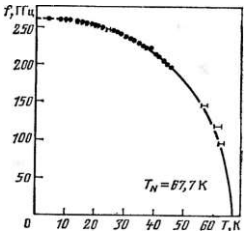


Рис. 28.8. Зависимость частоты АМФР в MnPr от температуры [24]:

результаты получены иа высоких частотах в малых магнитных полях. Горизонтальные черточки указывают погрешность при **H=0. Сплошная кривая** — нормированная функция **Бриллюэна ivля S-5/2**

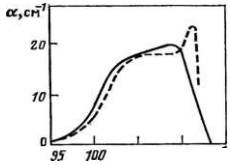


Рис. 28.9. Зависимость коэффициента поглощения *a* от частоты, характеризующая форму двухмагнонного поглощения, в MnFs при 7=4,2 К [26]:

электрический вектор электромагнитной волны параллелен легкой оси. Сплошная кривая — эксперимент, пунктирная—расчет

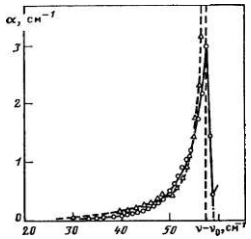


Рис. 28.10. Частотная зависимость коэффициента поглощения света в MnFs в области экситои-магнонной полосы поглощения при Г=2,2 К [27]:

VO=18419,6 см-' —частота магнитодипольной линии, соответствующей экситоиному возбуждению; максимум спин-волнового спутника электродипольного происхождения приходится на V-18477 см-'. Сплошная кривая — расчет, пунктирная —

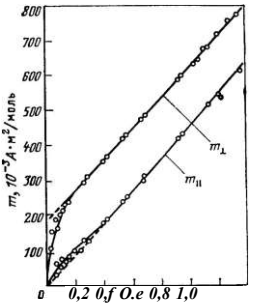


Рис. 28.11. Зависимость молярного магнитного момента от магнитного поля в МпСОз при Г=4,2 К [29]:

mjj — поле направлено вдоль трудной оси; m x — юле приложено в базисной плоскости. Спонтанный момент обусловлен взаимодействием Дзялошинского, а не типом анизотропии

обусловленных экситон-магионным переходом (рис. 28.10). Такие полосы в оптических спектрах антиферромагнетиков называют магионными спутниками; они отделены от чисто электронных переходов интервалом A(a»kT,j. Результаты изучения эффекта Фарадея в красной и фиолетовой областях спектра приведены в обзоре [28], посвященном оптическим и магнитооптическим исследованиям магнитоупорядоченных диэлектриков. Спектры люминесценции антиферромагнитных кристаллов, в том числе МпРг, обладают рядом низкотемпературных особенностей, происхождение которых не имеет однозначного толкования [7].

28.3. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ МпСОз, CoCO,)

Большой интерес с точки зрения как физических свойств, так и возможного технического применения представляют одноосные антиферромагнетики с анизотропией типа «легкая плоскость» (АФЛП). Выделенное направление в этих кристаллах является «трудной» осью для магнитных моментов подрешеток. Магнитная анизотропия в перпендикулярной этому направлению плоскости (ее называют базисной) обычно много меньше осевой анизотропии, и ею часто пренебрегают. Кривые намагничивания и спектр АФМР в кристаллах, обладающих анизотропией такого типа, существенно отличаются от соответствующих характеристик легкоосных антиферромагнетиков (рис. 28.11 и 28.12).

Ветви АФМР в АФЛП различаются симметрией участвующих в колебаниях компонент намагниченностей подрешеток [30]. Так называемая квазиферромагнитная ветвь (рис. 28.12) имеет щель СОДФМР *1^=0),* определяемую средним геометрическим большого обменного поля и малого поля эффективной анизотропии в базисной плоскости. В эту щель могут давать заметный вклад магнитоупругое [32] и (при низких температурах) сверхтонкое [33] взаимодействия. Обменное поле усиливает влияние и магнитоупругого взаимодействия на спектр фононов, приводя к сильной зависимости скорости звука в АФЛП от магнитного поля (точнее, от его компоненты, параллельной легкой плоскости) [34].

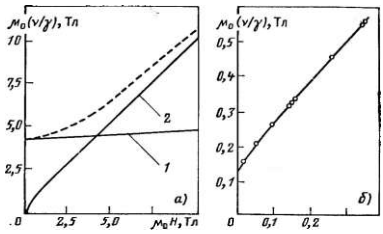


Рис. 28.12. Спектр АФМР в МпСОз при Г-4,2 К [31]:

с— сплошные кривые—поле приложено в базисной плоскости, пунктир — перпендикулярно; *1* — квазиантиферромагнитная ветвь колебаний; 2 — квазиферромагнитная ветвь (возбуждается переменным магнитным полем, перпендикулярным постоянному); б — экспериментальные результаты [331 для малых значений напряженности поля

Дисперсия спиновых волн в АФЛП обладает определенной анизотропией. Например, в CoCOз большую энергию при заданном [к] имеют спиновые волны, коцрые распространяются в направлении, перпендикулярном магнитному полю и легкой оси. Данные, приведенные на рис. 28.13 для CoCOз, получены методом одиомагнонного мандельштам-бриллюэновского рассеяния света с использованием в качестве анализатора интерферометра Фабри — Перо.

Особенности спектра и взаимодействий магнонов в АФЛП облегчают реализацию параметрического возбуждения спиновых воли в этих кристаллах [36]. В МпСОз при параллельной ориентации высокочастотного и статического магнитных полей параметрическое возбуждение магнонов квазиферромагнитной ветви происходит с участием вынужденных колебаний квазиаити-

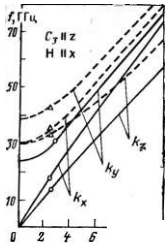


Рис. 28.13. Зависимость частоты магионов от волнового вектора при Я = 0 (сплошные кривые) и Но //=0,1 Тл для CoCбз [35,

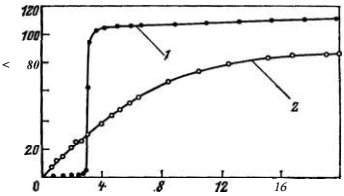


Рис. 28.15. Кривые намагничивания FeBrj [39]: янне, Г"=4,2 К; 2 — парамагнитное

ферромагнитной ветви и может иметь скачкообразный («жесткий») характер [37].

При измерении теплопроводности х в МпСОз и CoCOз были обнаружены особенности на кривых зависимости X *(T)* в точке Нееля (рис. 28.14) [38]. Кроме МпСОз и CoCOз достаточно подробно изучены свойства и других АФЛП: NiCOj, FeFs, PeBOз, а-PerOз (Тм<Г<Т^)''\ CsMnPa и др. (см. табл. 28.1),

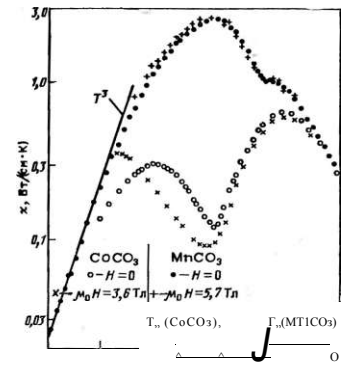


Рис. 28.14. Зависимость теплопроводности от температуры для CoCOз и МпСОз

28.4. МЕТАМАГНЕТИКИ

Метамагнетиками называют вещества, которые в отсутствие поля не имеют спонтанного момента, но приобретают его, начиная с некоторого критического поля. К ним относятся антиферромагиетики, у которых эффективное поле легкоосной анизотропии больше эфф««тивиого поля обменного взаимодействия: *2HA>HE,*

* Tj^ — точка .Морина — температура, при охлаждении ниже которой a-PerOз переходит из легкоплоскостного состоя-

Типичные зависимости ***M(H)*** метамагнетиков приведены на рис. 28.15. При Г<Г« и поле Я=Яо (Г) вещество переходит из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную, минуя спии-флоп-фазу. Ниже приведены температуры упорядочивания и значения полей перехода (при Т^Тц) некоторых типичных метамагиетиков **[15]:**

Метамагнетик	**7V,** К	**и„//о,** Тл
Feci,	23,5	1,05
FeBr;>	**11**	**3,1**
FeCOs		15,3 [40]

Более подробные сведения о свойствах метамагиетиков можно иайти в монографиях [1, 15].

28.5. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ СО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЗЯЛОШИНСКОГО

Существует ряд антиферромагнитных кристаллов, при описании магнитных свойств которых кроме изотропного обменного взаимодействия, определяющего собственно магнитное упорядочение, необходимо учитывать специфическое анизотропное взаимодействие Дзялошинского (ВД)*2. ВД, как правило, приводит к небольшому наклону магнитных подрешеток друг относительно друга и появлению слабого ферромагнитного момента.

В [10] рассмотрены условия, при которых магнитная симметрия кристалла допускает существование слабого ферромагнетизма. В тех случаях, когда тип анизотропии или другие обстоятельства (например, T>Ти) не допускают возникновения слабоферромагнитиого момента, наложение внешнего магнитного поля может приводить к возникновению определенных компонент антиферромагнитного вектора — так называемый индуцированный полем антиферромагнетизм [42].

Антиферромагиетики, обладающие слабым спонтанным моментом [МпСОз, CoCOз, а- Ре,Оз *{T>TM),* CuF?, Nip2, RPeOs (R — редкоземельный ион), NaNiPs, YCrO,

" PeBr2 обладает антиферромагнитной слоистой структурой, характерной для многих метамагиетиков (два соседних слоя металлических ионов имеют антипараллельное направление магнитных моментов).

Этот термин появился в литературе по магнетизму после феноменологического объяснения Дзялошинским [4f] природы слабого ферромагнетизма в некоторых антиферромагнитных кристаллах. Влияние ВД на основные свойства антиферромагнетиков исслсдопано в [10].

и др.], часто называют слабыми ферромагнетиками*'. В случае, когда подрешеток больше двух, их скос может не приводить к появлению спонтанного момента*^. В некоторых четырехподрешеточных антиферромагнетиках (например, СггОз [41], **CoSO4,** CuCl^ ^HzO [15]) две подрешетки дают слабый суммарный момент +т, а две другие — ш, так что полный момент образца равен нулю. Существует много кристаллов (наиболее характерные примеры C0F2 [43], а-РегОз при ***T<Tм),*** в которых при Я = 0 ВД не приводит к скосу магнитных моментов подрешеток, однако его необходимо учитывать для адекватного описания магнитных свойств таких кристаллов в сильных магнитных полях [44, 45].

28.6. ПЬЕЗОМАГНЕТИКИ И МАГНИТОЭЛЕКТРИКИ

Пьезомагнетики — это вещества, у которых при наложении упругих напряжений возникает спонтанный магнитный момент, пропорциональный первой степени напряжения. Пьезомагнитный эффект сравнительно мал и практически может быть обнаружен только в антиферромагнетиках, которые не обладают **в** нормальных условиях спонтанным моментом. Появление спонтанного момента в таких кристаллах объясняется изменением их магнитной структуры вследствие деформации при наложении упругих напряжений [2]. Пьезомагнитная намагниченность Mi связана с тензором упругих напряжений Oд соотношением Аf=A,7tO/*,. Д.ця MnF? и C0F2 **в** соответствии с требованиями симметрии отличны от нуля только три компоненты пьезомагнитиого тензора: И *Acxy* При 7=20,4 К эти компоненты для **CoF2** имеют значения: А-м/Н, Acxy==0,8-10—' А-м/Н [46]. В случае MnPr эффект примерно в 100 раз меньше. Пьезомагнитный эффект обнаружен также в FeCOa, a-FejOa и др. [47].

Магнитоэлектрики — вещества, у которых при помещении их в электрическое поле возникает магнитный момент, пропорциональный напряженности поля. Впервые магнитоэлектрический эффект был обнаружен в антиферромагнитном кристалле СГ2О3, Величина эффекта характеризуется тензорным коэффициентом пропорциональности Uik между возникающей намагниченностью и приложенным электрическим полем. Для СГ2О3 Uzz (250 К) =1.9-10-=' А/В [48]. Магнитоэлектрический эффект обнаружен также в антифероомагнетиках FesTeOe, Nb2Co409, NbsMnOe, TazMniOe [49] и др.*»

28.7. АКУСТОМАГНЕТИКИ

В антиферромагнетиках с высокой температурой Нееля квазизвуковые моды, возникающие благодаря связи между упругой (практически линейной) и магнитной (нелинейной) подсистемами, обладают сильной нелинейностью. Эта нелинейность особенно велика, если одна из магнитных мод без учета магиитострикции оказывается «мягкой» (а)рез~>0), что возможно либо в силу «легкоплоскостного» характера анизотропии (как в гематите а-Ре20з при ***Тм<Т<Тк),*** либо при приближении к точке той или иной спиновой переориентации (как, например, в редкоземельных ортоферритах (RFeOs). Большая нелинейность приводит к тому, что в антиферромагнетиках указанного класса реализуются звуковые аналоги явлений нелинейной оптики, такие как удвоение частоты звука и акустическое детектирование, самовоздействие звуковой волны, вынужденное комбинационное рассеяние звуковых волн, их самофокусировка и др. [51]. Очень большая магнитоупругая динамическая связь в этих твердых телах позволяет выделить их в технически важный класс кристаллов — ***акустомагне-1UKU.***

28.8. ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ

Органические сверхпроводники типа (TMTSF)2X, основанные на молекуле тетраметилтетраселенфулвалена



и имеющие в качестве X- один из ^мметричных октаэдрических анионов PFe, AsFe, SbFe и TaFg, обнаруживают сверхпроводимость при небольших давлениях р=(0—18)-10« Па и TJKI К. Некоторые из этих соединений ниже точки перехода металл — диэлектрик обладают антиферромагнитным упорядочением, характеризуемым волной спиновой плотности. Литиферромагнитное упорядочение зафиксировано в (TMTSF)**2** AsFeH (TMTSF)2PF6 при Г<Гс«12 К*' [53, 54]. Из измерений магнитной восприимчивости на моноКристяллических образцах [53] следует, что в (TMTSFjzAsFe реали.эуется простая антиферромагнитиая структура с легкой, промежуточной и трудной осями, направленными соответственно вдоль ***а, Ь'*** и с' [триклинную структуру (TMTSF)2X обычно аппроксимируют орторомбической с осями с, Ь'. с', определяемыми главными осями тензора электрического сопротивления]. В (TMTSF)2C104 сверхпроводящее состояние возникает при атмосферном давлении и Г«1,3 К, а антиферромагнетизм наблюдается при Г <6 К [55] после быстрого охлаждения,

28.9. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Помещаемый здесь справочный материал относится в основном к магнитным свойствам диэлектриков, обладающих антиферромагнитным упорядочением. Кроме того, приведены свойства некоторых антиферромагнитных полупроводников, металлов и металлических сплавов***2.**

Таблица 28.1 не охватывает всех известных к моменту издания справочника антиферромагнетиков. Составители стремились дать общее представление о свойствах различных типов антиферромагнитных /кристаллов, начиная от наиболее известных и хорошо изученных антиферромагнитных диэлектриков и кончая недавно открытыми сверхпроводящими соединениями. Важным, хотя и не необходимым, критерием отбора материала служил факт установления в соединении антиферромагнитной структуры методом нейтронной дифракции. Не было возможности с максимальной полнотой привести данные о некоторых группах соединений. Так, практически не представлена (кроме двух веществ) обширная группа

В зарубежной литературе их называют скошенными (canted) антиферромагнетиками, а термин «слабый ферромагнетизм» относят к ферромагнетизму нелокализованных электронов, имеющему место **в** ZrZibs и т. п.).

«В зарубежной литературе — «скрытое скашивание» (hidden canting).

Подробная классификация материалов по их магнитным, электрическим и упругим свойствам, выполненная на основе кристалломагнитной симметрии, дана в обзоре [501,

•1 Подробнее о природе п-рехода металл—диэлектрик, который не является переходом пайерлсовского типа, а также о связи сверхпроводимости с состоянием, описываемым волной спиновой плотности, см. в [52].

в [56] представлены основные классы антиферромагнитных диэлектриков.

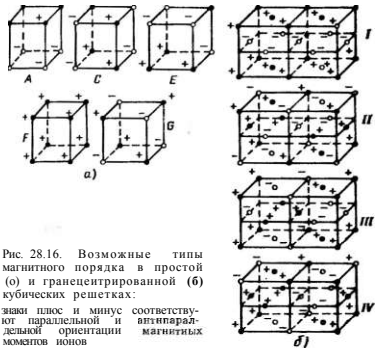


Рис. 28.16. Возможные типы магнитного порядка в простой (о) и гранецентрированной **(б)** кубических решетках:

знаки плюс и минус соответствуют параллельной и антипараллельной ориентации магнитных моментов ионов

антиферромагиетиков со структурой граната®. Отсутствуют также сведения о многих редкоземельных сплавах и соединениях*^.

Информация о магнитной структуре многих антиферромагнетиков, исследованных методом нейтронной дифракции, содержится в [3]. Типы магнитного упорядочения в кубических решетках приведены на рис. 28.16.

Последовательность расположения веществ **в** табл. 28.1 соответствует порядковому номеру магнитного атома в таблице Менделеева. Соединения с одним и тем же магнитным атомом расположены в порядке возрастающей сложности (например, соединения, состоящие из трех элементов вида RiAkBi с магнитным атомом R, расположены в порядке возрастания числа^ n=100i+ -ПОА+Z). При одинаковых числах *и* соединения расположены в порядке расположения атомов А и В в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева,

Условные обозначения и принятые в табл. 28.1 сокращения

I, II, III, IV — возможные типы магнитного порядка в гранецентрированной кубической решетке (рис. 28.16,6);

A, C, E, F, G — возможные типы магнитного порядка в простой кубической решетке (рис. 28.16, о);

И, 1^]. W — кристаллографические оси в триклинной, моноклинной, орторомбической и гексагональной сингониях:

(аЪ), (be), (ac)—кристаллографические плоскости в триклинной, моноклинной и орторомбической сингониях;

а*, Ь*, с* — векторы обратной решетки;

С — ось наивысшей симметрии в тетрагональной, тригональной, гексагональной сингониях;

D — спиновая размерность, определяемая числом ортогональных компонент спина;

d — размерность магнитной решетки, определяемая пространственной анизотропией обменного взаимодействия*';

Eg — ширина энергетической щели в спектре электронных возбуждений для веществ, обладающих свойствами полупроводников;

F, G, C, A—векторы, образованные линейной комбинацией магнитных моментов в четырехподрешеточной модели антифе ррома гнетика

F = (1/4) (Ml + Мг + Мз + М4):

G = (1 /4) (Ml — М2 + Мз — М4);

C = (1/4) (M1 + M 2 - M з - M 4) ;

A = (1 /4) (Ml _ Мг - Мз + М4);

ЯА — напряженность эффективного поля магнитной анизотропии*®;

Не — напряженность внешнего магнитного поли, при которой наблюдается та или иная особенность в зависимости намагиченности вещества от магнитного поля;

^«(0) — верхнее («второе») критическое значение напряженности поля при Г=0 К для сверхпроводника второго рода;

Hv — напряженность эффективного поля, связанного с взаимодействием Дзялошинского (см. § 28.5);

ЯЕ — напряженность эффективного обменного поля;

Ярез — напряженность магнитного поля, при которой наблюдается антиферромагнитный резонанс;

АЯрез — ширина линии антиферромагиитного резонанса по магнитному полю;

/ — константа, характеризующая обменное взаимодействие между соседними магнитными ионами в изотропных системах или же между соседними магнитными ионами внутри линейных цепей в квазиодномерных (rf=I) системах либо внутри плоскостей в квазидвумерных (rf=2) системах;

/' — константа, характеризующая об-

При модельном описании поведения антиферромагнетиков обычно рассматривают об.ченный гамильт

при этом модели

Гейзенберга (D-3) соответствует случай У fj^ модели

Изинга ХУ-модели (D-2) /"-./-О. Если J'V-'"', то говорят о спиновой анизотропии обменного взаимодействия, если /(Ry) по-равному зависят от R вдоль различных главных направлений кристалла, то говорят о пространственной анизотропии объемного взаимодействия.

Устойчивую спиновую конфигурацию (магнитный порядок) в антиферромагнитных кристаллах часто описывают с помощью инвариантов второго порядка, образованных из компонент векторов F, О, С, А и преобразующихся по одному неприводимому представлению пространственной группы кристаллов [И].

В таблице даны числовые значения магнитной индукции, соответствующие значениям напряженности магнитного поля в СИ (для вакуума справедливо соотношение l Тл=(lo-lA/м, где ц<,=4Я-10-^ Гн/м). Если не указана конкретная температура, то значение относится к Г^Тj^.

меиное взаимодействие между магнитными иоиами, принадлежащими соседним линейным цепям з квазиодиомерных (d=1) системах либо соседним плоскостям в квазидвумерных (rf=2) системах;

la. mb, ПС — магнигиая ячейка (в ***m, I. n*** раз увеличивается размео магнитной ячейки по срависниго с кристаллографической ячейкой соответственно вдоль кристаллографических осей а, 6 и с):

tis — число магнетонов Бора иа атом в состоянии насыщения;

р — эффективное число магнетонов Бора на атом в выражении, определяющем См(См=ЛГра^1i/ЗА;);

Ты, Tn(A) — температура антифферомагнитного упорядочивания, температура упорядочивания ионов А*';

/п — температура переориентации магнитных моментов относительно кристаллографических осей;

а(ц, [Ш]) - угол между направлением магнитного момента ц и кристаллографической осью ***jikl***,

e, См- - постоянные в законе Кюри — Вейса, **Хм**=Сы/**(Г — e)** (как правило, e<0);

- длина волны электромагнитного излучения, соответствующая частоте антиферромагнитного резонанса в нулевом магнитном поле (при ***T^T,)-.***

-магнитный момент иона (атома);

- магнитный момент иона (атома) А при температуре ***Т*** (в магнетонах Бора (Хв);

Avz- -частота ядерного магнитного резонанса, соответствующая внутреннему магнитному полю ия ядре ***^Z,*** где ***А*** — массовое число изотопа элемента Z;

р- - удельное сопротивление;

- молярный спонтанный магнитный момент при температуре ***Т,*** А-м2/моль (1 ед. СгСМ=10-s ^д^ СИ);

—удельный спонтанный магнитный момент при температуре ***Т,*** А-м7кг (1 ед. СГСМ=1 ед. СИ);

Значения температуры Нееля Тд, приведенные в табл. 28.1, получены в основном из данных измерений магнитной восприимчивости или нейтронного рассеяния. Значения Тбj. полученные из данных изме]ений теплоемкости (это отмечено в сносках), как правило, несколько от них отличаются.

ЦА (О К) — значение при ***Т—•***О К.

« в (О К) — значение при Г ^ О К.

Хм — молярн.ай магнитная восприимчивость, см'/моль (1 ед. СГСМ=, = 4зг ед. СИ);

ХУД —удельная магнитная восприимчивость, см^/г (1 ед. СГСМ=4я ед. СИ);

АФ — антиферромагиитное состояние;

АФВ между ***(ikl)*** — антиферромагиитное взаимодействие между магнитными атомами, принадлежащими соседним плоскостям ***(ikl),*** которое приводит к антипараллельной ориентации магнитных моментов атомов соседних плоскостей ***(ikl)-,***

АФМР — антиферромагиитный резонанс;

ВСП — волна спиновой плотности;

ГС — геликоидальная магнитная структура (ко — вектор распространения геликоида);

КС — коллинеарная магнитная структура;

ЛО — легкая ось;

ЛП — легкая плоскость;

МП — магнитный порядок;

ИКС — неколлиниеариая магнитная структура;

П — парамагнитное состояние;

СВ — синусоидально модулированная магнитная структура (спиновая волна);

СФ — слабое ферромагнитное состояние;

Ф ферромагнитное состояние;

ФВ (АФВ) в ***(ikl)*** — ферромагнитное (антиферромагиитное) обменное взаимодействие между магнитными атомами, принадлежащими одной плоскости ***(ikl),*** которое приводит к параллельной (антипараллельной ориентации магнитных, моментов атомов плоскости ***(ikl);***

ЯМР —ядерный магнитный резонанс.

Индексы в обозначениях отдельных физических величин*^:

11 (X) — данная величина относится к направлению, параллельному (перпендикулярному) выделенной в кристалле оси;

[Ш], [а1 ГЬ], [с] — данное значение относится к соответствующему кристаллографическому направлению.

Таблица 28.1. Некоторые свойства антиферромагнетиков

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
«А	Моноклииная	КС, ti|i[oioj	23,9		[3]
.-ко;'	Тетрагональная вЦ	*АФВ* между (001)	7	I Z T T ^>150 к	[3, 17]
БаТЮз	Орторомбическая D^	G-тип МП (Ti)	125	Металлическая проводимость при Г > 125 К	[59]
St-vs	Гексагональная D^,^	-	1040 900*2	е = — 3000 К = 6,6-10-® смз/моль	[17]
a-VSe	Гексагональная	–	163	е = — 2570 К	[17]
VF2	Тетрагональная D]^	ГС, . . „ С	7	е = — 80 К	[3, 17]
vci.	Тригональная D^^	–	30	–	[17]
V.O3	Тригональная *D^^*	Mil [111]	150		[3, 17]
VOCl	Орторомбическая вЦ	КС, м Ш [«]	80,5	(Ју (4 К) = 1,48^^ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, rf = 2	[60]
LaVOs	Кубическая	ц х С ФВ в (010) АФВ в (001)	133—144	е = — 665 К I^V (4,2К) = 1,31,х^	[3]
VsWOe	Тетрагональная *d*}^	НКС, (Л Х С	370	–	[3]
MgV,04	Кубическая *o1* (тетрагональные искажения при *Т с Т j ,)*	м н е	45	е = —750К, р = 3,43	[3]
CaV204	Орторомбическая Z)^®	КС, Mil[61 (а, 26, 2с)			[3]

Магнитные свойства о-КОj обусловлены наличием неспаренного электрона у 2р-молекулярной орбитали и-типа иона О".

— полупроводник. При Т = т электропроводность ме-

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура		^/v' к	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
гпУгОа	Кубическая (тетрагональные искажения при *Т С Т ^)*	КС, nil **с**	45	**е = - 2 5 6 К, р = 2,18**	[3]
а-Сг	Кубическая	(Л **Ii** [100] 122 К «	312	(Л (77 К) = 0,59fx^	
CrN	Кубическая С^ (орторомбические искажения при	IV тип МП, и Ii [ПО] *(2а, 2а, 2а)*	273		[3]
CrS	Моноклинная	ФВ в (011) АФВ между (011)	460	**е = — 6 9 5 К,** Р = **4,22**	[3, 17]
CrAs	Орторомбическая	НКС, **к**„||[с]	**260—280**	(.^^(77 К) = 2 , 0 ^ ^	[3]
CrSe	Гексагональная *D^^*	НКС а (и, 0 = 45^= (Зо, *За, с)*	200-300	Р = 4,6, (Лег (4,2 К)=2,9fx^	[3, 17]
CrSb	Гексагональная	КС ФВ в (001) АФВ между (001)	663-723	?м1г;1/4х= 1,92.10-3 см3/моль Нел4 (290 К) =	[3, 17]
CrRe (сплав с концентрацией Re больше 17%)	**г ц к**		160	Зонный аитиферромагнетик; све^рхпроводник при	[62]
CrF,	Моноклинная	ИП (010) *а(и,* [с]) = 32°	53	Р = 4,3, Fcr^+(4,2 К) =	[3, 17]
CrCU	Орторомбическая	ФВ в (011) АФВ между (011) *(а, 2b, 2с)*	**20**	**е = — 149 К** (лс,(4,2 К) = 3,68(л^	[3, 17]
CrSb,	Орторомбическая Г)]^	**Ф в ' м о п)** АФВ между (011) (0, 26, *2с)*	273	(-Сг(4.2 К)=1,49(л^	[3]
СгРз	Тригональная D®^	КС, Mil (111)	**80**	**е = —124 К р = 4 , 1 , (ЛсЛ4,2 К)=3[.^** а(0К)=169-10-з А-м^/моль	[3, 17]

Магнитная структура представляет собой стоячую ВСП дольная ВСП (Q \|\| vj), при ***Т*** > Г^р — поперечная ВСП (Q X ij)-

Магнитные моменты параллельны длинной связи Сг — Cl.

вектором Q и вектором поляризации ***ц.*** При ***Т<. Т^р*** ~ про-

продолжение табл. 28. i

Вещество	Структура		^/v. К	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
CrCl3	Тригоиальная Dg	КС, ц Х С ФВ в (001) АФВ между (001) (а, ***а,*** ***2а)***	16,8	6 = 29 К К)=2,82(х^ (1,7 К)=5 Тл 1^оН.у (1,7 К) = 0,26 Тл	[3, 17]
CrAu4	Тетрагональная	НКС,)i ***С***	380	*	[3]
Р-АЮч	Тетрагональная D^^	С) = 65°	598		[3]
Cr^As	Тетрагональная	1111 (001) ***(а, а,*** 2с)	393-438	е = —2067 К, р= 1,8 К)= f^crii (77 К)=1,2fx^,	[3, 171
CrA	Тригональная ***D^***	КС, 11Ш С	308	р = 2,6,fXc, (4,2К)=2,8(Л [XoW^L (77 К) = 5,9 Тл Х (0) = 189 мкм -в^сг (1,6К)=70,43МГцм	[3, 17]
Р-СгаЗз	Тригональная	КС, Л ± С	120—122	е = ~ 636 К [Xcri(4,2К) = 1,72fx^ I^Cril (4.2 К) = 1,36[Лд I^Criii(4,2 К) = 1,82^^	[3]
О А		–	100	6 = - 1 4 0 К	[17]
СГЗ54	Моноклиниая	[101]) = 29= (2й, ***Ь,*** 2с)	280	6 = - 5 4 7 К	[3, 17]
Сгз5е4	Моноклинная С^	lal1(loT) (20, ***Ь,*** 2с)	80	е = - 6 0 К (.Cri(4,2 К)=4fx^ t^Cr II (4,2К) = 3(Л^	[3, 17]
Cr^Se	Гексагональная	ГС. ко ll С при ***Т CTj^***	150—160	Ферримагнетик при = 305 К А'(7^/v)=1,85 А-м^/кг Р = (77 К) = 5-104 0м-см 1Х^,1(4,2 К) = 2,98(.^ (.Crii(4,2К) = 2,77(.g t-crili(4.2 К) = 2,78^j^ H-crlV (4,2К) = 2,75{Хд	[3, 17]
LiCrSa	Тригоиальная ***D*** или ***D%i***	НКС	55	Р = 3,83, Ь1^^(4,2К) = = 2,26^^	[3]
КСгРз	Тетрагональная	1l Х С А-тип МП	40		[3, 17]

*1 См. приложение П в £8].

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
УСЮз	Орторомбическая Dg®	КС, 0 Ⅱ *1C]* Ⅱ *[a]*	141	**Но** *f^c.laj* **= 3'3 Т.л*1**	[3, 17]
LaCrOa	Орторомбическая Dg®	G-тип МП	282—320	6 = — 430 К, р = 2,76 1м **(Г^лг = Ь 9 х** Х10-^® см^/моль **,Xc,3.(4,2K)=2,45tXg**	i i " '
СеСгОз	Орторомбическая Dja	-	257 (Cr)	-	i3|
РгСгОз	Орторомбическая *D^^*	КС, Мсг Ⅱ [«] П с Г '	**239** (Cr)	**е = —133К,** р = 2,87 **К)=2,46t^3** *У^Р,.^* **(4,2К)=0,5^ig**	Н i " '
NdCrOg	Орторомбическая D^	КС (Cr), fill [a] при ***Т>Т„,*** Г п = 2 0 К jull (001) [a]) = 60° при ***Т С*** Гц; КС (Nd), f, Ⅱ *[c]*	224 (Cr) 10 (Nd)	е = - 2 9 2 К, р=2,81 (лс, (4,2 **К**)=2,55(Xg	[3, 17, **63]**
SmCrOs	Орторомбическая оЦ	НКС, V Ⅱ [0] при Т > Т „ , Г„ = 38 К ,»|||[с] при Т С Т „	192 (Cr)	-	[3, 17l
ЕиСгОз	Орторомбическая Djft	-	181 (Cr)	-	**[17]**
GdGOs	Орторомбическая ***d***]^	-	170 (Cr)	е = - 2 0 к , р = 2 , 8	**117, 63]**
т ь а о з	Орторомбическая Z)]®	НКС^ТЬ) при Г > КС (ТЬ) при Г < Г п , ***Ти = 3*** к		бег = — п о к К) = 8,6^g	[3, 17]
DyCrC^	Орторомбическая вЦ	КС (Cr) */^cr* Ⅱ W НКС (Dy)	146 (Cr) 2,1 (Dy)	е с , = - 3 5 К , (Хсга+(1.5К) = **2,76tJL.g eoy** = -1 К**,[.Ло^Ч1,5К)** =	[3, 17]
НоСгОз	Орторомбическая ***D^***	Изменение структуры Сг при Г„ = 80 К НКС (Но)	141 (Cr) 12 (Но)	бег = - 2 8 К, *(.Cz* (4,2 К)=2,94(.^ (.Но(4,2К) = 7(.^- АФ-компонента Ф-компонента	**[3, 17]**

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
ErCrO3	Орторомбическая Dg®	КС (Cr) (r Ⅱ [й] при Г > Гц = 20 К « (^.^[a]) = при	133 (G) 16,8 (Er)	l^Er»* (4,2K) = 5,2,x^	[3, 171
TmCrO3	Орторомбическая Dg®	КС (Cr)	(Tm)«	(xт^,. (4,2K) =	[3]
YbCrO3	Орторомбическая D^^	КС (Cr)	3?0 (Yb)	(4,2K)=2,80fXg	[3, 171
Lu&Oa	Орторомбическая вЦ	КС, J1Ш (010) a ((Л, [a]) = 63°	112 (Cr)	Fcr (4,2K) = 2,51	[3, 17]
PbClO3	Кубическая	G-тип ЛШ (2a, 2a, ***2a)***	210—250	e = -240K, p = 2,83 [^Cr (4,2K)=	[3, 17]
CrV04	Орторомбическая D^	ФВ в (001) АФВ между (001)	50	,Xc^+(4,2K) = 2,1 p = 4	[3, 17]
CrUOi	Орторомбическая ВЦ	КС, ± [c]	45		[3, 17]
	Гексагональная Dg^	КС ФВ в (001) АФВ между (001)		6 = — 4 К при низких температурах e = — 243 К при высоких температурах	13]
Cr^BeOi	Орторомбическая D^	ГС, ко Ⅱ [c] ji Ⅱ (010)	28	I (4,2 K) = 1,55^13 l^Cr ,i(4,2K) = 2,75fX3	[3]
MgCrjOi	Кубическая (тетрагональные искажения при ***mcm^)***		16	6 = — 350K, p = 3,84 (4,2K) =2,63^^д	[31
C0Cr2O4	Кубическая	НКС при ***TcTj^*** (3a, 3o, ***a)***	31 Ф АФ	Ферримагнетик при Г^у < Г < Г с = 97 К	[31
ZnCr.O^	Кубическая ***o*** (тетраго1?альные искажения при	НКС ti Ⅱ (100) lll [010] (2a, 2a, 2a)	16	e = - 392 К	[3. 171
Cr^TiSj	Моноклинная Cf^	(2a, ***Ь, 2c)***	-	-	[3]

При r < r _ маг Тт обладают ферромагн упорядочением.
При ***T*** = 13,5 К — перестройка АФ-структуры.

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
Cr,NiS,	Моноклинная *C^*	ФВ в (101) АФВ между (101) (2a, *b, 2c)*	-	-	[31
ZnCr^Si	Кубическая	-	20	e = 18 K	[65]
HgCr2S4	Кубическая 0I^	НКС при Г < 25 K	25 АФ	Ферромагнетик при 2 5 K < Г < T c = 60 K	[3]
ZnG2Se4	Кубическая	НКС при *T<Tj^* fil1 (001)	22 (Ф АФ)	e = —1 1 5 K, (xc, (4,2 K)=3,x^ Ферримагнетик при *Tи<T<* Г c = 129K	[3, 17]
CrrTeOв	Тетрагональная оЦ	НКС, ц _L C	105	(4,2K)=2,45tx^	[3, 17]
Cr^WOe	Тетрагональная	НКС, »п *C*	69	e = —1 9 6 K,	[3]
CrTiNdOs	Орторомбическая *O^^*	НКС f^Cr 1l1 И f^cni1lH fiNd 11 (001)		(Xi,,(1,5K) = 2.89fx^ (Xc,(1,5K) = 2,95tx^,	[3]
	Кубическая Г®	-	6,004	Хм 103 смз/моль	[17]
Ж -		-	*0,02*	-	[17]
a-MП	Кубическая	Сложная многоподрешеточная	100	tx(OK) «;0,5ti^j (усредненное значение)	[2, 3]
1-Mn	Кубическая	I тип МП	1370	fx = 2 , , устойчив при 1352 K < r < 1 4 1 6 K	[3]
MnO	Кубическая 0| (ромбоэд рические искажения при	(2a, 2a, 2c)	113-120	e = - 6 9 8 K, p = 5,97 X (0) = 362 мкм = 5txg 66v;^„(1,5K) = 618Mra*i	[3, 17]
MnP	Орторомбическая D^	ГС, ко Ⅱ [a] при	47 (Ф-> АФ)	Ферромагнетик при *T^<T<cTc* =291 K [Хои, (4,2K) = 0,24Тл (Xo«/[b](4,2K) = 0,62 Тл	[3, 17]

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера, тура
	кристаллографическая	магнитная			
=i-MnS	Кубическая	II ТИП МП fi 11(111) (2o, 2a, 2a)	146—155	e = -465K.^M„.44,2K)=	[3]
P-MnS	Кубическая *T^*	III тип МП (c, 2a, c)	150	6 = -982K. (x^„.+(4.7K)= -См = 6-10-3 смз/моль	(3. 17]
MnSe	Кубическая	II тип МП fii - [1111 (2a, 2a, 2a)	147-150	6 = -740K, iu*(Tj*,)/47t = = 19-10-3 CMS/MOЛЬ Полупроводник, *Eg* — = 0,68 эВ	[3, 17]
MrfTe	Гексагональная	ФВ в (001) АФВ между (001) *11*II (001)	307-310	e = -e92K, p = 5,97 = 4,6.10-3 смз/моль tx„„,+ (290K)=4,6(x^ Полупроводник, = 1 эВ	[3, 17]
MnNi	Тетрагональная	JILC	1070-1140	(0K)=4^д t^Ni (0K)<0,6(гд	[3. 17]
t-MnNi	Кубическая	-	453		[3]
MnCu	Тетрагональная	fxil C	300	Сплав (69—85% Mn)	[17]
MnPd	Тетрагональная		813—825	(xp<j(4,2 K)<0,2(Xg	[3]
MnRh	Кубическая (тетрагональные искажения при	—	170	e = — 260 K	[171
MnИ	Тетрагональная	Изменение струиуры (2a, 2a, c)	970	(XM„(290K) = 4,3(X^,	[3]
P-MnAu	Тетрагональная	A-тип МП (a, *a, 2a)*	513	e = -бoок, p=з,9 XM(7'iv)/4" = 4,3X X 10-3 см3/моль	[3, 17]
MnHg	Кубическая	G-тип МП 1III [001] при Г < 198 K (x II [111] при Г > 198 K (2c, *2a, 2a)*	460	X 10-3 смз/моль p(Гд,)=5-10-'Ом.м ^МП(4,2К) = 3.7(X^	[3, 17]

Ч Возможные магнитные структуры i

Продолжение табл. 27.7

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
IrMn	Тетрагональная D^^	АФВ В (001)	> 1200	ttM„(290 K) = 3,4fx^ (290 K)=0,2,x^ (49% lr)	13]
MnBj	Гексагональная	м С ФВ в (001) АФВ между (001) (0, ***a, 2c)***	>885	f^Mn(77K)==2,6(.^	[3]
Р-МпОг	Тетрагональная	ГС	84-94	6= ЮБОК, р = 5,52	[3, 17]
MnS2	Кубическая ***Т^***	III тип МП Ц Ь [010J ***(a, 2a, a)***	48	е = - 592К, р = 6,3	13, 171
MnSej	Кубическая Г®	fill [010] ***(a,*** За, ***a)***	75	е = —483К, р=5,93	[3. 17]
MnTej	Кубическая	I тип МП fi **I** (001)	84	е = -528К, р = 6,22	[3, 17]
MnFa	Тетрагональная D^^	^lllC	67,3	**е = -113К,** (0К)/4« = = 25-10-» смз/моль, Х(0)= **1,11** мм (4,2 К) = 9,33 Тл t^oA^pe3=3-10-« Тл при ^АФМР = 23 ГГц 55v„„(0K)=680 МГц«	[3, 171
MnClz	Тригональная	а ***((X, C)*** = 57 при ***m c T f j***	1,96	**е = —3,3к, р = Б,73**	[3, 17]
MnBrr	Тригональная ***D^***		2,16	**е = -4.66К,** (^Mn(1.35K)=5tx^	[3. 17J
Mnl2	Тригональная ***D^j***	ГС*з	3,4		[3, 17]
MnSnj	Тетрагональная	Изменение структуры при 3"= 73 К	323-325	f'Mn (4,2K) = 2,33ti^	[3, 17]
MnAuz	Тетрагональная оЦ	ГС	363—370	К) = 3,04(x^	13, 17]

См. приложение II в [8].

' Плоскости (011) с ферромагнитным упорядочением чередуются в последовательности

» Ферромагнитное упорядочение а плоскости (307). Магнитные моменты в соседних плоскостях (307) повернуты на угол в/16.

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
MnP3	Моноклинная ***C^^***	f* Ⅱ (101)	47	e = 8 K, p = 5 (4,2 K) = 4(Xд	[3, 171
a-MnZns	Кубическая ***01*** (тетрагональные искажения при	A-ТИП МП (a, ***a, 2a)***	155	—	[3]
MnPёз	Тетрагональная D^^	***IxiC***	220	f-Mn(77 K) = 4,1(Xд	131
MnAиз	-	-	145	6 = 200 к	[17]
Mn,N	Орторомбическая	***ИКС***	301	t^Mn(120 K)=1,6(x^	[31
Mn,P	Гексагональная ***D^***	-	103-110	1 (4.2 K) = 0,02tx^ f^Mn „(4,2 K) =1,68^^	[3]
MnjAs	Тетрагональная ***D\f^***	***IX*** Ⅱ (001) (a, ***a,*** 2c)	573	6 = — 1947 K, p=2,58 ^^мш (290 K) = 3,7(x^ (^мп II (290 K) = 3,5(Xд	[3. 171
УМпг	Кубическая ***0***	-	100		[651
Mn,Oз	Кубическая	-	80	-	[17]
AиьMпг	Моноклинная C^„	-	353	6= 120 K, p=5,56	[3]
Mn^Hfo	Тетрагональная Df^	ФВ в (001) АФВ между (001) fX_LC	342	f^Mn(4.2K)=4.5.a^	[31
MnjRh	Кубическая	ИКС fi 11(111)	853	t^Mn (4,2K)=3,5(Xд	[3]
Mпз3п	Гексагональная	ГС, ко II C при Г < Г п = = 270 K	420	t^Mn(4.2K) =2,5(x^	[3]
MпзP1	Кубическая	КС при Г > Г п НКС при ***T<Tп*** Гп = 365K	475	Ып (77 K) = 3,0 (x^	[31
PdsMn^	—	—	593	e = -430K XM(?'JV)/4« = = 2.10-5 смз/моль	[17]

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
MnзCCr	-	-	164 (Ф->АФ)	Ферромагнегик при Т ^ < Т < Т с =283К Ас (164 К) = 3,5А.м2/кг	[17]
MnsSis	Гексагональная Dg^	ИХ С (2а, ***а, с)***	62-68	е = —9,1 К, р = 4,05 I(4,2K) = 0,4(x^ f^MNLL(4.2K)=1,2(x^	[3J
MnOOH	Моноклинная	Модулированная с периодом 0,488 нм	40	-	[3]
FeMnAs	Тетрагональная dJ^	(Л ⊥ С (а, ***а, 2с)***	463	TIFE(290K) = 0,2(x^ fx^n (290 К) = 3,6 (x^	[31
CuMnSb	Кубическая Г|	III тип МП FILL [111] ***(2а, 2а, 2а)***	38	(4,2 К) = 3,9(x^	[3]
MnCOз	Тригональная ***D^^***	(анизотропия типа ЛП)	32,5	е = —64,5К, о(0К) = = 18,8-10^ А • м^/моль X(0) = 2,44 ***MM*** FlO'O =0,44 Тл (4,2 К) = 640МГц*1	[3, 17, 31]
MnSiOs	Триклинная	–	–	е== — 45 К, р=5,91	[17]
CaMnOз	Кубическая	С-тип МП (2а, 2а, 2а)	123-130	6 = -425 К, а(0К)^0 Хм {Т***II*** = = 4,7-10-3 смз/моль	[3, 17]
Ca^MnOi	Тетрагональная оЦ	(а 1/2", ***а V 2 , 2с)***	U4	К) = 2,0,x^	[3]
ScMnOa	Гексагональная	***ИКС***	120	fx^n (4,2 К)«!4,0(X^,	[3, 17]
MnTiOs	Тригональная С\i	***fcWIUlJ***	60-65	6 = -219 К, р=5,93 = 5,2 Тл	[3, 17]
MnCeOз	Орторомбическая ***of^***	***IX*** II ***m***	16	6= - 46 К, р==5,48 t^Mnid.l К) = 4,37tx^ t^Mnild.l К) = 4,27(X^	[3, 17]
MnYOa	Гексагональная	***1XA.C***	46	е = -475К, о(0 К):?tO	[3, 17]

См. приложение II в [8].

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
BaMnO3	Гексагональная Z)^	KC, ml C *{ a V ¥ , a V 3 , c)*	2,3	t^Mn(b8 K)=3,0(x^	[3]
SrMnOs	Кубическая *0*	G-тип МП (2c, 2c, 2a)	260		[31
BaMnO3	Орторомбическая	НКС A^Py-тип МП	100-150	e = 40 K, o (ок) = = 1,21 А-м2/моль XlO-3 см3/моль (x„„„+ (4,2 K)=3,7(Xp	13, 17J
PrMnO3	Орторомбическая D^	KC, nil *[b]*	91	(Xм„3+(1,5K)==1,77(X^	[3]
NdMnOg	Орторомбическая D^	KC, и Ⅱ (001) a(,x, ffc]) = 36°	85		[3]
HoMnO3	Гексагональная Cgj,	И Ⅱ *C* при *TcTn* = 50 K И X C при Г > Гп	76	t^Mn (4.2 K) = 3,5(x^	[3, 17]
ErMnO3	Гексагональная	НКС ***a(u,*** C) = 70°	79	tx„„(4,2 K)=3,5(x^	13, 17]
TrMnO3	Гексагональная ***Cg^***	НКС a(ц. C) = 45°	86	(x^„(4,2K)= 3,8(X^	[3, 17]
LuMnOs	Гексагональная Cfj,	НКС a(ц. C) = 55°	91	(x^„(4,2K) = 3,7(x^	13, 17]
NaMnFg	Орторомбическая ***D^^***	G-тип МП a Ⅱ [c]	67	(x„//£ =39,0 Тл (XoЯд = 0,43 Тл (Xe//^=2. 10-2 Тл	[3, 17]
KMnFg	Тетрагональная Z)®^ при Г < 91 K	C-тип МП (2a, 2a, 2a)	88	e = — 238 K Ом (4,2 K) = 19,3 X X 10-3 А-м2/моль*1 17,7 X X 10-® см®/моль K) = 5,06(x^ =4,5-10-2 Тл (XeИ^ = 86,8 Тл (4,2 K) = 676 МГц*2	13,6,
RbMnFs	Кубическая	G-тип МП fx||[111] (2c, 2a, 2c)	83	e = - 118 K =0,28 Тл tXoW^ = 4 . 10-« Тл (X„Я£ = 89 ТЛ 17,7X X 10-® см3/моль	[3, 6, 17, 66]

Спонтанный момент в KMnFj появляется при температуре ***T*** = 81,5 K- Изменение структуры при =81,5 K представляет собой переход первого рода,
i См. приложение П в [8].

Продолжение табл. 27.7

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
CsMnFg	Гексагональная	Анизотропия типа ЛП ц J_C	51-54	=0,75 Тл« (XoW^j^ = 1,1 • 10-^ Тл txo«£ = 35 Тл (4,2 К) = 666 МГц*2 Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 3	[3, 6, 17, 66]
TlMnFs	Кубическая	G-тип МП	77	e=-125K, (X„«£=68,0ТЛ tx„«^ = 0,67 Тл (x(4,2 К) = 4,9(.з	117]
NHiMnFs	Кубическая	G-тип МП ***(2a, 2a, 2a)***	84	-	[3]
NaMnClg	Тригональная	ц X C (анизотропия типа ЛП)	6,5	e= 1 к	[6J
KMnClg	Тетрагональная ОЦ ([c]/[a])= 1,005	-	100	e = -122к tXoc£ = 122 Тл	[6, 17]
KMnCIs	Орторомбическая D^f^	ГС^ 1\ периодом	2,1	t^Mn(1.4 К) = 3.78(X^	[67]
RbMnCla	Гексагональная*^ ***Dtn***	[x ***S***.C (анизотропия типа ЛП)	95	e = — 204 К Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга До|(4,2К) = = 4-10-® А-м®/моль при (Xe'j'^ = 0,63 Тл	[6, 17]
CsMnCls	Тригональная Dg^	(П J_C (анизотропия типа ЛП)	67-70	e = - 145 К, (Xo/£ = 70,0 Тл (XoW'j^ = 5,26 Тл =0,74 Тл	[6. 17]
TlMnCls	Орторомбическая	G-тип МП	118*6	e = -259 К, t^Mn (77 К) = 4,7(Хд (Хц/Уд = 0,16 Тл при ***T.*** = 108 К*^ переход АФ СФ	[3, 6]
NH4MnCl3	Кубическая (орторомбические искажения ири ***T*** < Tjy)	G-тип МП (2a, ***2a, 2a)***	105		[3, 17]

« =2,48-10-' Тл, где Я^ — поле анизотропии, полученное нз измерения высокочастотной ветви АФМР [i17].

« См. приложение И в [8].

По данным [67] структура перовскита — пространственная группа .

Гексагональная структура при комнатной температуре. При ***T*** = 272 ***K*** из оптических измерений обнаружен структурный переход

•' указаны в соответствин о [3], = 110 К — по данным [6].

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	криста ллографическа я	магнитная			
CsMnBrg	Гексагональная D^^	**ГС,** ко **Ⅱ с** (а / *г* , ***аУТ, с)***	8,3	fl = _ 167 К, J M = 9 , 9 K Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = l	[6]
T1Mn1з	Орторомбическая D^^	ГС, ко Ⅱ Ь*1 M Ⅱ (001)	6,0	е = 10.6 К, р = 5 . 9	[68]
MnS04	Орторомбическая D^	ГС, ко 11 [fl] с периодом 3 нм	**И**		[3, 17]
MnSe04	Орторомбическая Dg®	КС, ц Ⅱ (001)	20		[3]
MnW04	Моноклинная С^^	(4а. 26, 2с)	14-16	е = - 71К, р = 5,83	[3]
MnU04	Орторомбическая ***D^***	**М** Ⅱ И	12	**е** = - 8 К , **fXM„(4.2** К) = смз/моль	(3, 17J
BaMnF4	Орторомбическая С^^*^	НКС	26	(х(4,7 К) = 4,8^^д Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 2	[6, 120]
Mn(0H)2	Тригональиая В\а	НКС ***{аУЗ , аУз, 2с)***	12	6 = - 2 8 К, t^M„(4,2K) =	[3, 17]
MnA1A	Кубическая	1Ш [100]	6	**е = - 15 б к, р** = 5,13	[3]
MnGaA	Кубическая	Ц||[111]	33	ё = - 154 К, Р = 5,77	[3, 17]
a-MnOar84	Моноклинная **Cf^**	_	23,5	**е = - 5 0 К**	[69]
P-MnGa2S4	Орторомбическая **с|„**	_	11	**е** = —28К	**[69]**
K2MnF4	Тетрагональная ***D^***	nil C (2а, 2о, *с)*	42—45	***\J'IJ*** = 10-α, ***kTff и*** = = 10,1 Магаитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 2	[3, 6]

*** при ***Т*** > 247 К; при г = 247 к — структурный фазовый переход в несоизмеримую фазу, при котором происходит ; ячейки в плоскости *Бс* и возникает несоизмеримая модуляция структуры вдоль оси [а].

Продолжение табл. 27.7

	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
RbgMnFi	Тетрагональная Z)]^	nil C (2a, 2a, c)	38	$T^ /6 = 0,44$, $\Gamma/J\ = 10\text{-}6$, $^\Gamma д,// = 10,3$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 2	[3, 6]
RbaMnCli	Тетрагональная oЦ	mi C (2a, 2a, *c)*	56	**$Гд_{,}/e$** = 0,39 (^мп (4,2K) = 4,4(.g = 10-e, $kT^ /J = 9,2$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 2	[3, 6]
CSgMnCU	Тетрагональная Z)]^	fx11C (2a, 2a, c)	52	p = 5,9 Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 2	[31
a-Cs^MnCU	Орто ромбическая	.	0,93"	**e = - 4 К**	[17]
MnNbA	Орторомбическая *ПЦ*	C;,-тип МП (a, *2b, c)*	4,4	**e = - 18 к**	[3. 171
MnTagOg	Орторомбическая	G^. Cr-тип МП a((r, [a1)= 10'	.	–	[3]
PdjMnAl	Кубическая	И тип МП	240	f.Mn(4,2K) = 4.4(x^	[31
PdjMnln	Кубическая	11 тип МП (2a, 2a, 2a)	142	6 = - 5 0 K . [x„„(4,2K) =	[31
MnCQHsk	–	.	134	6 = - 492K, p = 7,18	[171
Mn2Si04	Орторомбическая	KC*2 п Ш ^ п р н $\Gamma > \Gamma_{„}$, = ИКС при $\Gamma < \Gamma_{„}$	50	6 = — 1 6 3 K, p = 5 , 8 7	[3, 17]
CaMnrO^	Орторомбическая oЦ	KC, fill [c] (2a, *b,* c)	225	6 = 2 9 4 K, p = 4,72 [^мп (4,2K) = 3,6|x^	[31
MnjGeOi	Орторомбическая Z)^!	ИКС	24	**e = - 162 к, p=5,85**	[31
ZnMnjOi	Тетрагональная	.	200	.	[64, с. 325]

Из измерений теплоемкости. "1^Mn111M' "^MnП образуются енную АФ-структуру. при $T <$ ^=>20 К, КС при Гц < ГС Гдг = 47 К [116].

Продолжение табл. 27.7

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
BjMnjOs	Орторомбическая	**НКС** ***(2a, b, c)***	52	e = — 236 К	[3]
Mn^GeS^	Орторомбическая *вЦ*	КС, Gy-тип МП	-	(^МП (4,2 К) = 4,7 (X^	[3]
	Тетрагональная ***dU^***	КС, 1X\\C	483	Р = 2,4, = 1,75(Хд	[3]
ThMn^Gea	Тетрагональная *оЦ*	НКС	400	Р = 2,4	13]
CusMn^Al	Кубическая	*11*11 (001)	873	^Мп (4,2 К) = 4,5^^	[3]
МПЗВ4	Орторомбическая	КС при 226 к < г < г д, ГС при ПО К<Г<226 к ко **Ii** ***г*** КС при Г < ПО К *fill \c]*	392	e = —543 **к,** (x^„„(4,2 К) = 2,92(x^ t^Mn II (4.2 К) = 0,44(x^	[3]
МпзСаС	Кубическая	КС, |11||[П1] ***(2a, 2a, 2a)***	150-164 (ф АФ)	^„„(4,2 К)=1,8(x^ Ферромагнетик при Гд, < < Г < Г^ = 248 К	[3, 17]
MnjNiN	Кубическая	НКС (изменение структуры при Г = 180 К)	-	t^Mn(77 К) = 0,98(x^	[3]
MnsZnN	Кубическая	НКС (изменение структуры при Г = 140 К)	***Г^*** = 183 К	(^Мп I = l>21(x^j при 140 ***К<г<г^*** (^Mni(4,2 К) = 0,61f.g (^Mn „(4,2К)=1,0(x^	[3, 17]
MngGaN	Кубическая	НКС	298	t^Mn(4,2 К) = 2,34(x^	[3]
CsMngCU	Тетрагональная	-	0,59"	e = -0,9 К	[17]
МПЗВА	Орторомбическая *вЦ*	-	35	e = _185 К, p=6,18	[3]
ЩМщО,	Тригональная £>3^	КС (хЦС	110*2 125	e = —250 **к,** К) = 5(x^ Магнитоэлектрик при 140 К < Г < Гд,	[3, 17]
	Тригональная ***D^***	-	103*2	Магнитоэлектрик	[17]
Оу^МпЛ	Орторомбическая	-	8	-	[17]

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
LiMnPOa	Орторомбическая ***D^***	КС ***11***П [100]	35	е = —80 К, р = 5,2 Хм(7'лг)/4«=33Х Х 10-3 см^/моль	[3, 17]
CuMnSnS,	Тетрагональная ***D^***	КС ***11***11 (101) (2с, ***а, с)***	-	НМП.Л290 К) = 4,3,.^	[3]
BaaMnUO,	Кубическая	ФВ в (001) АФВ между (001)	12,8		[3]
MnCla-fflaO	Моноклинная ***С^***	КС М = 7°	1,62	е=-1,79К,Ь1о/^,,,(1,2К)= = 0,25 н-0,5 Тл = 500,4 МГц«	[17]
MnBra-4H20	Моноклинная cf^	КС ***[c]***	2,136	(1,2 К) = = 0,75-^1,0 Тл	[17]
MngAlaGCgOia	Кубическая	***ШС****^	6,65	е = —28 К, Р = 5,89 ***с/1*** (0) = 39 ГГц*з	[121, 122]
a-RbMnClg-• 2H2O (a-RMC)		КС	4,56	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, ***d=*** \ ***J/k|*** = = 3,0 К, 1 ***J'/J 1*** = = 7-10-3 Н.оЯ„„= 1,31 Тл = 20,0 Тл ^ = 4,27-10-2 Тл	[71]
CsMnClg-•2HaO (CMC)	Орторомбическая	КС	4,89	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 1 ; IJ/fc| = = 3,2К, ***J'/J**\ =8.10-^ ***liobH,.*** = 1,64 Тл ^^o^я = 23,8 Тл ^***„Hл*** =5,65-10-2 Тл	[71]
CsMnBrg. •2H2O (CMB)	Орторомбическая	КС	5,75	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d= 1; ***J/k**\ = = 3,0К, ***J'/J**\ =11-10-' {.„Я„„ =2,05 Тл = 22,3 Тл =9,41-10-2 Тл	[71]
MnSiF,-•6H2O	Тригональная	-	0,1	-	[17]

(Л1 = —3->-Л1 = —2) в квадрупольно-расщепленном спектре ЯМР на врнентированных ядрах моменты марганца лежат в плоскости (111) и направлены вдоль или против осей [211], [121] и [112].

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
STo^'-	Триклинная	-	1,80*1	-	[17]
(TMMC)	Гексагональная ***D***^^ (моноклинные искажения при ***T***< 171 К) структурный переход при Г = 45 К	КС	0,84	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d= 1; U/A;| = = 6,7 К, 10-* = 1,14 Тл НоЯе=49,9 Тл НоЯ^ =1,30-10-2 Тл	(6, 71]
(MMC)	Моноклинная С^	—	4,12	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d= 1; **J/k***\== = 3,01 К, **J4JI** = = 6-10-3	172]
		КС	3,60	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d= 1; |У/й| = = 6,5 К, |У'/Л=10-» = 1,83 Тл fio Яд = 48,4 Тл =3,46-10-2 Тл	[71]
а г' - (PMCA)		КС	2,32	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзецберга, ***d*=\;** **Jlk***\ = ^дЯд =48,4 Тл (ХоЯ^ = 1,03-10-3 Тл	[71]
	Моноклинная Cf/,	-	3,2	**е = —5,2К, см(0 К) =** = 2,79 А-м^/моль	[3, 17]
м д а о , .	Моноклинная Cf^	1Ш (100)	3,7*2	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, d = 2; |y/fe\ = 0,35	[17, 73]
Mn(DCOO)2-•2DjO	Моноклинная С^^	в **1** (101) при ***a*** **Ц** ***Jb/*** при Г < Гц	3,7	tx„„„+ (2,5 К) =	[3]
i r	Моноклинная	–	0,14	°м(0 К) = 7,82 А-м2/моль	[17]

« Из измерений теплоемкости.

При этой температуре упорядочивается только часть магнитных моментов. Остальные моменты обусловливают парамагнитные свойства. При Г = 0,23 К наблюдаются аномалии Шоттки в поведении теплоемкости.

Вещество	Структура			дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
PeO	Кубическая (ромбоэдрические ис-кажения при	II тип МП Jill [111] (2a. ***2a, 2a)***	198	6 = - 5 7 0 К, р = 4,6 Хм(Гд,)/4:г = = 8-10-3 смя/моль	[3, 171
FeSi	Кубическая ***T^***	-	523	6 = - 149 К, р = 2,55	[3, 17]
FeP	Орторомбическая ***D^^***	ГС, ко1! [с] И-1 [с] ***(a, Ь,*** 5с)	125	6 = - 50 К, (хре, (4,2К) = 0,46(.д t-Feu(4.^K) = 0,37,x^	[3, 17]
FeS	Гексагональная ***D^^***	Ⅱ ***C*** при Г < Гп = 390 К fi1 C при Т > Гп	593-600	6 = - 9 1 7 К, Хм(Гл/)/47==2,2х Х 10-3 смз/моль	(3, 17]
FeCo	Кубическая	_	1253	f^Co=	[3]
FeGe	Гексагональная	КС, м н е ***(a,*** с, 2с)	400-412	Р=3,13ftpj4,2К) = = 1,67^5	[3]
FeAs	Орторомбическая ***D^^***	ГС, ко1|[с1	77	Р = 3 ,1, f^Fe (4.2 К) = = 0,5(x^	13]
FeSe	Гексагональная ***D^f^***	_	847	Ферромагнетик при Г <423 К	[17]
FeSn	Гексагональная Dg^,	ФВ в (001) АФВ между (001) И Ⅱ (001) (с, ***a, 2c)***	365-373	6 = - 158 К, р = 4,5 f^Fe (4,2К)=1,55,.g	[3]
FeRh	Кубическая	G-тип МП (2с, 2а, 2а)	328 (Ф->АФ)	Ферромагнетик при ***T^ CTcTc*** = 668 К Aay„=(328 К)=117А.MVKr р(0 К) = 5-10-' Ом-м	[3, 17]
FeFj	Тетрагональная	t4|C	78	е = _117К, f^Fe«+(23К)- Х (0) = 189 мкм	[3, 17]
FeCU	Тригональная ***D^***	ФВ в (001) АФВ между (001) lll1 C ***{2a, 2a, 2a)***	23	6 = 48 К, р = 5,26 Метамагнетик: Яд > Мо Ⅱ =1,05 Тл	[3, 6, 17]
FeBr,	Тригональная ***P^^***	ФВ в (001) АФВ между (001) fill c (0, а, 2с)	11	0 = 6 К, f.F,(4,2К) = Метамагнетик: Яд > Я £ fio^^ll ==3,15 Тл	,3,0.

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
Felj	Тригональная	f^1ic	10	6 = - 23 K Метамагнетик: Нд > Н^ Поведение в магнитном поле описывается моделью с 8—12 подрешетками (4 фазовых перехода по магнитному полю)	[3, 6, 17]
FeP,	Орторомбическая D^^	–	250*1	e = - 1 7 K, = 1,18-Ю-^" смз/моль	[17]
FeGe,	Тетрагональная D^	ц Ⅱ (001)	270-315	e = - 5 1 0 K, (Xpe(4,2K)~	[3, 17]
FeSn,	Тетрагональная D^	***(2a, 2a, c)***	377—384	в = - 2 3 0 K, /5 = 3,36 Хм = = 1,95-10-3 CMS/моль	[3, 17]
FeTes	–	–	85	e = - 3 2 0 K, p = 0,194	[17]
FeFg	Тригональная D®^	KC, nil (111)	362—365		[3, 17]
FeCls	Тригональная C^^	ГС	10	**e = —115K, p = 5,73**	[3, 17]
FePtg	Кубическая	С-тип МП ***(2a, 2a, a)***	120	(Xpe = 3,3fA^	[3, 17]
FejAs	Тетрагональная ***D^/^***	***(a, a, 2c)***	368	6 = - 9 0 K, p = 4,66 (Xp,,(290K) = 1.28(x^ Hpe и (290 K) =2,05,.^	[3]
«-FeA	Тригональная D®^	И Ⅱ С при T < ***T****^ f. i. C при	950—959	f^Fe (4.2 K) =4,9,^3 ®'vp^(290K) =71,2 МГц*^' См (300 K) = = 3-10-^ A-м2/моль (Ao^E =900 Тл Тл ^oЯ^П (77 K) = 6,8 Тл Fo (77 K) = 16 Тл	[3, 17]
FeOF	Тетрагональная	f^11C	315	Hpез+(4,2K) =4,8,.^	[3]

"См. приложение II в [8].

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическа я	магнитная			
FeOCl	Орторомбическая ***D^^***	-	92,3	-	[17]
LiFeOg	Тетрагональная Z)]^	КС Jill с при $\Gamma > \Gamma_n = 90$ К mi (111) при $т < \Gamma_n$	315	(77 = o(0 К) ^ 0	13, 17]
P-FeNaO^	Орторомбическая ***C^^***		723		13, 17]
CuFeSg	Тетрагональная ***D^^***	а ± ***C***	815-823	***Eg = 2,5*** эВ	[3, 17]
PeBOз	Тригональная	***mc*** lull (111) ***я ± C***	348	HFe(77K) = 4,7,x^ f'io^o (293K) = 6,2Тл ®'vp^(77 К) = 76,5 МГц*1	[3, 17]
PeCOз	Тригональная ***D^j***	КС И!|С	38	e= —14 К, ***i^H^..*** = = 15,3 Тл Магнитные свойства соот-ветствуют модели Изинга	[2, 3, 40, 74]
FeTiOg	Тригональная Cg^	ЦU J. [111] ***(2a, 2a, 2a)***	68	***p = 5,23***	[3, 17]
FeVOg	Тригональная ***D^^***	-	-	-	[17]
YFeOg	Орторомбическая £>2^	с Ⅱ [001]	640-650	$o_{„}$ (4,2 К) = 0,30 А • м2/моль ,.ОЯЛ4,2К) = 7,25 Тл*2	[3,17]
1aPeOз*з	Орторомбическая Dg^	в Ⅱ [001] ***/2a, 2Ь, 2c)***	738-750	**e = -480 К,** $o_{„}$*4=О,24 а • м^/моль	[3, 17]
CePeOз	Орторомбическая D^^	***a*** Ⅱ [001] при Т > Т ^ , Γ_n = 230 К	719	-	[17]
PrPeOз	Орторомбическая Dg®	в Ⅱ [001]	707—711	Р = 3 , 6	[3, 17]
NdPeOg	Орторомбическая Dgft	***(2a, 2Ь, 2c)***	687-689	p = 3 , 6 , (43 К) = 4,57{Лз	[3, 17]

См. прилож([8].

При Н = Н происходит фазовый переход второго рода, магнитной еиннетрии [75].

Обзор свойств ортоферритов (RFeOa, где R — редкоземельный ион) в [76], магнитные ориентационные переходы в ортоферритах рассмотрены в [111].

Значения о в RFeO, даны для 7 < Гд, (Fe), ***во Т>Т^ (Я).***

Вещество	Структура			дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
SmFeOg	Орторомбическая вЦ	в II [100] при Г < Г п с Ⅱ [001] при Гц = 470- 490 К	672—674	Ом = 0,21 А-м^/моль	[3, 17]
ЕиРеОз	Орторамбическая off^	б Ⅱ [001]	666	Ом = 0,20 А-м^/моль	[17]
GdFeOg	Орторомбическая D^^	Ajf-тип МП при Г > Г п = 80К	657—670 (Fe) 2,6 (Gd)	е = -4,3К, р = 8 Ом = 0,26 А-м^/моль	[3, 17]
ТЬРеОз	Орторомбическая D^f	-3 Ⅱ [001] при (при Т = 3,1 К изменение магнитной структуры подрешеток Tb)	650—681 8,3(Tb)	Р = 9,7 fxp,(97K) = 4,8(x^ Ом = 0,35А-м2/моль	[3, 17]
DyFeOg	•Орторомбическая D^^	о II [001] при Г > Г п, о = 0 при Г < Г п, 7-п = 30--40К«	645-648 3,74Dy)	Ом = 0,33 А-м^моль Переориентация магнитной структуры при Т = Тп происходит скачком	[3, 17]
HoFeOg	Орторомбическая оЦ	в II [100] при Г < Г п в II [001] при Г > Г п Гп = 51--63К	639—647 6,Г(Но)	р = 10,5 f^Fe3+(43K)=4,6n^ 0^ = 0,24 А-м^/моль	[3, 17]
ErFeOз	Орторомбическая вЦ	в II [100] при Г < Г п в II [001] при Г > Г п Гц = 80-- ШОК	636—643 3Л,5 (Er)	Р = 9,5 Ом = 0,23 А-м^/моль	[3, 171
TrPe0.ч	Орторомбическая	в II [100] при Г < Г п а 11 [001] при Т > Г „ Гп^во-г-эгк	630—632	Р = 7,3 Ом = 0,32 А-м2/моль	[3, 17]
YbFeOg	Орторомбическая вЦ	в II [001] при Г > Г п,	627—634	р = 4,5 Ом = 0,35 А-м2/моль	[3, 17]
ЬиРеОз	Орторомбическая *D^*	fi1IM	622—625	с „ = 0,28 А-м^'/моль	[3, 17]
BiPeOg	Тригональная	-	643	–	[17]
KPePз	Кубическая (тригональные искажения при *Т < Т^)*	G-тип МП Jill [111] *{2a, 2a, 2a)*	113		[3, 17]

•1 При низких температурах (Г < Г^) в DyFeOs наблюдается ряд фазовых переходов, индуцируемых : I полем. Магнитные свойства DyFeOs соответствуют модели Изинга.

Предполагаемые структуры.

продолжение табл. 28. i

Вещество	Структура		^/v. К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
RbFeFg	Кубическая ***oi***	G-тип МП ***Ггс, 2а, 2а)***	102-105	6 = - 8 8 К, р = 5,82	[3, 17]
RbFeClg	Гексагональная Dg^	ИКС	2,5	При Г = 2,35 К и Т = = 1,95 К магнитные фазовые переходы с изменением структуры	***[77]***
CsFeFg	Гексагональная D^	С) = 75=	60—62	t^Fe» **(77 К) =**	[3]
KFeCIj	Орторомбическая Og®	КС, imllC ФВ в (001) АФВ между (001)	15	**(77 К) -**	13]
TlFel3	Орторомбическая ***D^***	M Ⅱ lb] ФВ в (100) АФВ между (100)	21,5	**е = — 44 К, р = 6,7**	**[68]**
FeP04	Тригональная	НПС	25	**в = — 60 К**	[17]
FeS04	Орторомбическая £>2^	КС, imlllfel ФВ в (010) АФВ между (010)	21—23	6= - 30,5 К, ***р=5,2 Хм [Tfj)/47Z*** = = 78,5 • 10-3 CMSMOЛЬ К) = 4,1^^	[3, 17]
FeNbOi	Моноклинная ***C^***	lit Ⅱ (010) ФВ в (100) АФВ между (100) ***(2a, Ь, с)***	-		[3]
FeTa04	Тетрагональная O]^	***fxWC***	180	**6 = - 456 К, р = 5,3** Ферримагнетик при **Г < 30 К** (XP,^ **(77 К) = 2**,96(X^	[3]
FeWO^	Моноклинная	nil (010), «([., [a]) = 29= ФВ в (100) АФВ между (100) ***(2a, Ь, с)***	76	**е = 27К, р = 5,41** f.Fe(4.2K)=2,19tx^	[3]
FeU04	Орторомбическая	КС*^ и Ⅱ [Ь]	55	р = 5,42 При Г < 42 К ферромагнетик со слабым антиферромагнетизмом, р = = 3,2-10' Ом-см	13, 17]
KFeF4	Орторомбическая ***D^***	ft Ⅱ ***[с]***	137	-	[3]

При Т> кубическая структура; при 87 К < Г < Г^ — тетрагональные искажения; при Г = 40 -5- В7 К — орторомбическая Е>:Clгруктуры.

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура		^лг. к	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
BaFeF4	Орторомбическая Cg^	**Ta1 a,** *2c)*	54	Магнитные свойства опи-сываются двумерной мо-делью (Хре.+ **(4,2К)=4,1** {Хд	[3, 17]
RbFeFi	Ортороыбическая C^^	Il *m* ФВ в (111) АФВ между (111) (а, *2b, c)*			[3]
FeAUOi	Кубическая	-	8	**е = —76К, р** = 4,14	[3]
FeSb,04	Тетрагональная оЦ	**нкс** *ULla]*	**46**	ДРе.^- (4,2К)=3,8[х^	[3, 17]
Rb2FeF4	Тетрагональная ОЦ	*L , c)*	50—56	Гд,/е|=0,54 Магнитные свойства соот-ветствуют ХК-модели "а /«е =0,1	[3, 6]
PeCrr5e4	Моноклинная	а (ц, [101]) = 55° ФВ в (101) АФВ между (101) (2с, *b, 2c)*	4,2	—	[3]
FeNbsOe	Орторомбическая оЦ	*КС* ц Il *[a]* (с, **2b,** *c)*	< 2 5	(Хр,{4,2К)=3,87tх^	13]
PeTa^Об	Тетрагональная	**« i f** M) = 45 *(2a, 26, 2c)*	14		[3]
BajFeFe	Тетрагональная D^	**fill C** (•2а, 2с, *c)*	48	Магнитные свойства соот-ветствуют 2«г-модели **(4.2 К) = 3,46(Хз**	[78]
FeNb^Se	Гексагональная Dg	**fill C**	—	**е** = - 100 К, Р = 4„93 fXpe (4,2 КХ=	[3]
Fe,Si04	Орторомбическая Dg®	Т > Г п = 2 0 К НКС при Г < Г п	65	е = - 150 К, 6,03 **I**-Fel = **t**-Fen **(4,2 К)=4**[Л^	[3, 17]
FeJiOi	Кубическая (тетрагональные ис-кажения при		140—142	f.F,(4,2 К) = 4,2,.^	[3]

I^Fe I II '^Fe U "^разуют скошенную АФ-структуру *гра Г* [116].

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура		^/v. к	Дополнительные сведения	Литера-тура
	криста.ллографическая	магнитная			
CaPe,04	Орторомбическая Dg^	**КС, *u\\[c]***	180-200	**e = - 580 К, p = 5,4** (4,2 **К) =**	13]
ZnFe204	Кубическая	**и к с** (с, ***a, 2a)***	9-17	6 = - 2 1 К	[3, 171
BaFe,04	Орторомбическая	Ог-тип МП	**880**		13]
Pe^MuцP	Орторомбическая оЦ	НКС **Г.! И .)**	340	6 = - 81 К	131
FefieSi	Орторомбическая ***D^***	НКС (изменение структуры при Г = 69К)	108	tXp,,(4,2K)=3,98(x^ f^Fell (4,2K) = 3,60^^^,	[31
Fe^TeOe	Тетрагональная	nil C	201-218	Магнитоэлектрик	[3, 17]
Ca^PerOв	Орторомбическая ***D^***	Ⅱ lc] ***c<a<Ь***	720—730	**e = - 6 1 5 К** txp,3+ (4,2K) = 4,5tx^	[3, 17]
Sr^Fe^OB	Орторомбическая оЦ	КС, н и м	600-700		[3, 17]
Pe^MozOв	Гексагональная ***C^***	lullC	59,5	***Bj^* <— 2 0 0 К, e|| = - 7 5 к** Pj^ = 4 , 4 , **= 5 , 8**	[79]
NagPesOg	Моноклинная ***C^^***	J- [001]	**375-381**	**f'o ^эФ = 51,0 Тл*1**	[3, 17]
a-FeOOH	Орторомбическая Dgfi	КС, УЛ Ⅱ ***[Ь]***	330-403	P = 6,4, (77 К) =	[3, 17]
^-FeOOH	Тетрагональная	nil C	273-285	6 = - 6 4 0 К, (Xp,зИ77К)=	[3]
7-FeOOH	Орторомбическая ***D^***	КС, ФВ в (001) АФВ между (001)	50-75	*P* = ***4,9***	[3]
6-FeOOH	Тригональная ***D^^***		450—460	'^FeI=f^FeII (77 К) =	[3]

« Эффективное поле сверхтонкого взаимодействия, усредненное по трем неэквивалентным позициям ионов Fe»+.

Вещество	Структура		^д;. К	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
LiFeP04	Орторомбическая ***D^***	-	53	***y***-oHj; =43,0 Тл	[17]
FeTiNdOs	Орторомбическая of^	**нкс** (a, ***b, 2c)***	-	-	ГЗ]
FeCrWOe	Тетрагональная ***D/^***	КС, lull C	-	-	[3]
Ca^FeAlOs	Орторомбическая ***D^***	***Ii*** Il ***/a/***	60	-	[17]
FeCl2-2H,0	Моноклиииая C^^	fii 11(101) [c]) = 58°	23	Метамагнетик [л^Я^ = 3,92 Тл (ХоЯ,^ = 4,56 Тл	[17]
FeCl2-4H20	Моноклинная	***И*** Il [Ь]	1	Хм (7^л/)/4я=0,105 см^/моль	[17]
K3Fe(CN)e	Моноклинная Cg^	-	0,129	-	[17]
FeSOj-HaO	Моноклинная C℞ₘ	КС, н и м	-	-	[3]
FeCA-SHaO	-	-	20	-	[17]
CszFeFs • • 2H2O	Орторомбическая ***Olf^***	н Il ***Ы***	2,4	Анизотропия типа ЛО	[801
	Моноклинная	**нкс, в** Il ***lb/***	15—20	Ом = 4,46 А-м^'/моль (4,2 К) = 0,82(x^	[3, 17]
	Моноклинная	Jill (101)	8—12	f^Fe =	(3, 17]
	Моноклинная	**в** Il **[Ь]**	3,7	***сфО*** f^Fe1(1.5 К) = 3,7tx^ Магнитные моменты Fe11 упорядочиваются при	[3, 17]
	-	-	0,043	Хм = 1 >0 см8/моль	[17]
(органометалли-чвский полимер)	—	—	>300	в малых магнитных полях переходит в ферромагнитную фазу (Ро W<6• 10-2 Тл)	81
CoO	Кубическая (тетрагональные искажения приГ<7'д,)	a(ц, [001]) =27,4° ***(2a, 2a, 2a)***	291—292	e = - 280 К, р = 4,96 Xm(7^W)/47C = 5,3 X X 10-3 смз/моль (77 К)= 3,52f.^	[3, 17]

продолжение табл. 28. i

Вещество	Структура		к	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографичес кая	магнитная			
Cos	Гексагональная Dg^	-	358	6 = - 632 К, р = 1,7	[17J
CoFg	Тетрагональная вЦ	Ⅱ [001]	***2,7,7***	6 = - 5 2 , 7 К Mvco (0 К) = 180 МГц*! X, (0) = 351 мкм*2 Xr (0) = 278 мкм = 12,0 Тл*з ^Co^. (23 К) = 3^^	[3, 17l
CoClg	Тригональная	ФВ в (111) АФВ между (111) ***(2a, 2a, 2a)***	25	6 = 20 К Магнитные свойства при соответствуют модели двумерного анти-ферромагнетика	[3, 17]
CoBГз	Тригональная	IX Ⅱ (001) ***(a, a, 2a)***	19	Магнитные свойства при ***T*** соответствуют модели двумерного анти-ферромагнетика	[3, 17]
a-Co1г	Тригональная	**^lyc**	3	-	[17]
CoSeg	Кубическая	(a, ***a, 2a)***	93	6 = - 160 К, Р = 2 , 2 [*Co (4,2 **К**)=11Xд Полупроводник	[3, 17]
C0F3	Тригональная ***D^***	КС, цН [111]	460	[Jeo (4,2 К) = 4 , V^	[3, 17]
C03O4	Кубическая ***01***	И Ⅱ [001]	40	**e** = = - 5 3 **К, р** = 4 , 1 4 [.CO«4-(4,2 К) = 3.25i.jg	[3, 17]
C0CO3	Тригональная ***D^***	**0 X c**	18,1	6 = —52 К, р = 4,34 Анизотропия типа ЛП а (0 К) = 1,4 А-м^/ыоль = 2 , 7 - - 5 , 1 Тл-6	

^^ Центральная частота квадрупольно-расщепленного спектра, состоящего из семи линий (/ = 7/2) [82].
При Н Ⅱ [001] й-факторы для X, ,*(II)* и X. ,(Я) соответственно равны g_L = 1,18 и g|| = 2,80.
В интервале ^ J, < Ж Яг ц ^ ц , = 21 Тл, Цоя^ ^ g = 25,5 Тл^ реализуется угловая фаза. в которой моменты под. решеток отклонены от оси *С.* на разные углы [831.
, ><!„ = 7 . 10-« А . м-/моль [84].

Вещество	Структура				Литература
	кристаллографическая	магнитная			
CoTiOg	Тригональная cl^	nil (111) (2a, ***2a, 2a)***	37—42	e = —9,3 К, p=5,46	[3, 17]
CoCeO3	Моноклинная C®^	-	8,5	e = - 14 К, p=5,33	[17]
NaCoFs	Орторомбическая oЦ	КС, НИИ	74—78	(4,2 К) = 3,4,.^,	[3]
KCoF3	Кубическая (тетрагональные искажения при Г<78 К)	G-тип МП (2a, ***2a, 2a)***	135—144	6 = — 125 К 59^^,^= 372,7 МГц*1 ^Co» (4,2 К) = 3,31л^	[3, 17]
RbCoFg	Кубическая (тетрагональные искажения при ***TC*** 101 К, c/a = = 0,997 при Г = = 4,2 К)	G-тип МП (2a, 2a, 2a)		e = —180К, p = 5,53 ^Co (4,2К) = 3^^,	13, 6, 17]
CsCoFs	Тригональная	-	8	e = —62К	[6]
RbCoCIs	Гексагональная		18	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, d = 1	[6]
CsCoCb	Гексагональная Dg^	КС при Г > 9,2 К	21	e = -100К Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, rf= l; U'/Л = = 1,6-10-2 Ферримагнетик при Г < 9,2 К	[6]
RbCoBrs	Гексагональная Dg^	КС, nil C ***[УЗа, V s a, c)***	36	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, ***d=l*** [^Co(4.4К)=3,4[.g	[3, 6, 17]
CsCoBrg	Гексагональная Dg^	КС при Г > 15К nil C	28	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, d = 1 Ферримагнетик при Г<15 К	[6]
0-CoSO4	Орторомбическая вЦ	ИКС	12-15	e = — 47 К, p=5,65	[3]

ч Значение центральной частоты квадрупольно-расщеплепного спектра, состоящего из семи линий со средним интервалом между ями Av =2,1 МГц [87].

Вещество	Структура		^N- К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
[5-C0SO4	Орторомбическая Dg^	НКС	12—15	e = —24 К, p = 5,65 **Хм (Гл,)/47г = 62** X X 10-3см8/моль 1,2 Тл [.Co (4,2 К) = 3,8[.^,	[3, 17]
CoSeOj	Орторомбическая ***D^***	НКС	30	p = 3,64	[3]
CoWO4	Моноклинная ***C^^***	Ц Ⅱ (010) ФВ в (100) АФВ между (100) ***{2a, b, c)***	55	***O/Tj^*** = — 1,55	[3]
CoUO4	Орторомбическая	НКС, |л|| [а] и |л||[с] **(2a, *b, 2c)***	12	e = — 23 К **Хм**(Гл,)/4,. = 83x X 10-3 смз/моль I-CO (4.2 К)=4,06(.^,	[3, 17J
BaCoFi	Орторомбическая ***СЦ***	И Ⅱ ***[a]***	70	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, ***d = 2*** l^co'^ (4,7 К) = 3,41л^	[3]
CoRhgOi	Тетрагональная	-	27	6 = — 30 К	[17]
K.**CoF4**	Тетрагональная D^^	nil C (2a, 2a, c)	107—125	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, rf=2; 1 ***J'u*** 1 «10-« ***Ha/HE = 0,7***	**LJ**
Rb^CoF,,	Тетрагональная вЦ		101	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, d = 2; \ ***J' / J*** \ ^ / Яд = 0,8	[88]
CoNb^Oe	Орторомбическая Dg^	IX Ⅱ [a] (a, ***b, 2c)***	-	-	[3]
C0CS3Cl5	Тетрагональная	-	0,52	-	[17]
CoCssBrj	Тетрагональная	-	-	-	[17]
C02Si04	Орторомбическая ***D^***	КС **Су-тип МП**	49	e = - 6 5 К, p = 5,09	[3, 17]
GeCo,04	Кубическая	nil (111) (2a, 2a. ***2a)***	20	e = —90 к, P = 4,7 1Jlcoз+(4,2 К) = 3,2[.^,	[3]

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	~агиитная			
Co^MosOB	Гексагональная	^ilic	40,8	ej^ = -185K,/7j^ =5,9 бц = —95 К, /7|| =5,8	[79]
Созад	Орторомбическая D^	КС, nil [c] (a, 26, 2c)	30-37	6 = -63 К, p=5,29	[3]
NbsCoA	Тригональная D^^	КС, и Ⅱ С	30	**e** = _ 10 **К, р** = 4	[3, 17]
TasC040g	Тригональная Dg^	-	206*1	-	[17]
LiCoPOi	Орторомбическая D^	КС Ау-тип МП	23	6 = -90 К, P=5,7 = 32 Тл	[3, 17]
NH4C0F3	Кубическая (тетрагональные ис-кажения при Г<Т^v)	G-тип МП	124	0:5^=0 при	[89]
NaaCoSiOj	Орторомбическая cf^	ИХ И (2a, ***b, 2c)***	4	^co(1,2 K) = 2,7[.g	[3]
Na,CoGe04	Орторомбическая cf^	***a Ш)*** = 80° (2a, ***b, c)***	4	^co(1,2K) = 3,0fX3	[3]
BaCoWOe	Кубическая ***0***\	***a(u,*** [111]) = 20°	-	-	[17]
Ba^CoWOi	Кубическая C^	II тип МП (2^a,' 2a, 2a)	17	^co(4,2K) = 2,0fX3	[3]
Ba2CoU04	Кубическая	ФВ в (001) АФВ между (001)	9		[3]
COC1s-2H20	Моноклинная	ИП ***m***	18	Метамагнетик f^^r.. [6] = 3,2 Тл X 10-2 см3/моль	[3, 17]
CoBra-rHrO	Моноклинная ***C^^***	***IX***II ***m***	9,5	6 = 0 К Метамагнетик	[17]

магнитоэлектрического эффекта.

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
CoC1г-6HrO	Моноклинная C^^	И ll [c] (a, ***b, 2c)***	2,3	6 = - 20 K XM(ГЛ,)/47.= 17,8 X X10-2 см3/моль [.CO.+ (1.5 K) - 3,8[л^	[3, 17]
CoBГз-6HrO	Моноклинная	-	3,2	-	[17]
	Моноклинная	-	S,7	e = —4 K, Xм (Гл,)/47г = 2,8см3/моль	[17]
Co(HsO)e • •SiF,	Тригональная	a X C	0,15	a = 3,5 • 10-2 . 2Mo*1	[17]
CoCl2[(NH2b- •CSk	Тетрагональная C^^	-	0,92*2	-	[17]
CoJ^gO,,.-	-	-	0,193	-	[17]
Co(HCOO)2 •	Моноклинная	ll (100)	5,1	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, rf = 2	[17]
CO(NH4)2 • .(S04b-6H,0	Моноклинная	-	0,084	a » 7 , 1 A • м2/моль	[17]
• (C104)2	Моноклинная		0,49	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, ***d = 2***	[90]
NiO	Кубическая (ромбоэдрические искажения ниже Гд,)	ti 11(111) II тип МП	523	e = —2470 K, P = 4 , 6 X (0) = 274 мкм	[3, 17]
NiS	Гексагональная Dg^	^ilic ФВ в (001) АФВ между (001)	263-265*3		[3, 17]
NiAs	Гексагональная D^^	ц J. C	150	6 = - 300 K	[17]
NiFa	Тетрагональная вЦ	н к с «II [010]	73	e = —100 **K** a = 0,35 A • м2/моль Xi (0) = 3000 мкм Xg (0) = 320 мкм (23 K) = 2,хд	[2, 3]

= 2/Мд = /Vng[i S, где *N* — число Авогадро, n — число магнитных ионов в молекуле, g — фактор Ланде, s — спин магнитного иона.

Из измерений теплоемкости.

Переход П А Ф обладает свойствами, характерными для перехода первого рода; в точке перехода изменяются параметры кристаллической ячейки: *Aa/a* == з • Ю-!"; *Ac/c* =10-8.

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллог рафическая	магнитная			
NiCls	Тригональная Dg^	J I X C	52	6 = 67 К	[17]
NiBr,	Тригональная	-	60	е = —2 о К, р = з , о	[17]
NiCOg	Тригональная D®^	**и к с** б Х с «(ц, [111]) = 63°	25	Ом(4,2К)=2,08А-м2/моль (ХоЯд = 9 , 0 Тл =24,0 Тл	[3, 17, 84]
NiTiOg	Тригональная ***С^***	И -L [111] ФВ в (111) АФВ между (111) (а, ***а, 2а)***	23	е = - 1 1 К, р = 3 , 2 Х(0) = 1,6 мм l^Ni (4.2 К) = 2,2^^,	[3, 17]
NaNiFs	Орторомбическая ***D^***	НКС nil (010) о Ⅱ ***[с]***	138-156	6 = — 280 К Ом = 0,335 А-м2/моль [ЛоЯд = 16,2 Тл [ЛоЯд = 1,2 Тл = 200 Тл« К) = 2^^	[3, 17]
KNiFg	Кубическая	G-тип МП IX Ⅱ [001] ***(2а, 2а, 2а)***	275	е = - 234 К Хм (Гл,)/471 = 2 , 0 5 х Х 10-3 см3/моль Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, rf = 3 [ЛцЯе = 3 , 6 • 102 Тл [ЛоЯ^ = 2,7 • 10-2 Тл	[3, 6, 17, 661
CsNiFs	Гексагональная D^^	***li±C***	2,61	Магнитные свойства соответствуют XY-модели, rf= 1	**[6]**
RbNiCls	Гексагональная ***D^^***	ГС	**И**	**е = —101 к** К) = 1,5[1„ 1 ***J'/J*** 1 = 2 . 10-2 Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, rf=l	[3, 6, 17]
CsNiCl3	Гексагональная Dg^,	ГС при Г > Г п = 4 , 4 К ft II (010) при ***T<Tj,***	4,85	**е = - 6 9** К, Р = 3 , 4 1 Х| (0 К)/471=3,5Х Х 10-8 смз/моль Хх (0 К)/47г = 7 , 3 х Х 10^® см^/моль Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, rf=l; ***U'/J*** 1 = 6 - 1 0 - 2	[3, 6, 17, 119J

Значения эффективных полей получены из экспериментов по АФМР в предположении анизотропного **эффект**ивного g-фактора ается: gjj.^ - = g^^ = g^^^ = — 2,5 • 10-8 (ж, ***у, z*** направлены соответственно вдоль осей [а], [6], [с]).

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллография еская	магнитная			
TlNiCls	Гексагональная Dg,j	н к с	13	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, rf= l; 1 **J'IJ** I = = 2-10-2	**[6]**
NiSOi	Орторомбическая вЦ	КС, fill [6l ФВ в (010) АФВ между (010)	37	**е** = —82 **К, р = 3**, 82 ОБм = 15 X X 10-3 смз/моль Р(4.2 К) = 2,I[.^,	[3, 17]
NiCrOi	Орторомбическая вЦ^	КС Ajf-тип МП	**23**	6 = - 105 К (4,2 К)=1,28(х^	[31
NiSe0.i	Орторомбическая вЦ	jLl [c] Ад-у-тип МП	27	р=2,14	[31
BaNiFj	Орторомбическая сЦ	КС, HI Il [6] (а, 26, 2с)	150	[iNi (4,2 К) = 1,96[Хд	[3. 17]
Ni(OH),	Тригональная	КС, nil C	28-35	р = 3,2 ,.N,(78 =	[3]
K,NiF4	Тетрагональная dJ^	fil1C	97	6 = - 600 К (4,2 К) = 18,0 Тл / Яд = 2 • 10-3 Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 2 ; « 10-е	**[6, *Щ***
RbaNiFj	Тетрагональная	fil1C	91	|Г^v/e| = o,41 (4,2 К) = 35,0 Тл / Яд = 10-2 Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, rf,= 2 ;|J7^|=	[6, 17]
NiRhsOi	Тетрагональная	-	18	6 = — 20 К	[17]
TbNiF,	Тетрагональная вЦ^		101	= - 0 , 4 2 Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга,й = 2; 1У7У|= = 10-6	[6, 17]
NiSiOj	Орторомбическая	-	8,2	е = 14 К	[17]
BagNiFe	Тетрагональная оЦ^	nil C (2а, ***2а, с)***	93	(4,2 К) = Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 2	[78]

Вещество	Структура		К	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
GeNiA	Кубическая	H11(111) (2a, 2a, 2a)	15-16	**e = -6 к, p==3,24** K) = 2,2(.д	[3, 17]
NisB^O,	Орторомбическая D^	**нкс** (a, 26, ***2c)***	**49**	**e = —5 К, /7=3,07**	[3]
LiNiro4	Орторомбическая Dj®	КС Аг-тип МП	23	**e = —79 к,** p=**3**,35	[3]
SrNiMoOe	-	-	71,5	-	[17]
NHNCB	Гексагональная	НКС	**9**	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d= 1	[6]
NajNiAlFs	Орторомбическая C^	**нкс** o||[fc] при Г < 1 1 К	90	Слабый ферромагнетик при	[3]
Ba^NiWOe	Кубическая	**И'^тга'мп** (2a, 2a, 2a)	17		[3, 17]
NiClj-eHjO	Моноклинная	cc(ц, [a]) = 22° (a, Ь, 2c)	**5,34—5,8**	**e** = - 7 **К**	[3, 17]
NiBr.-eHjO	-	-	**6,5*1**	-	[17]
Ni3B,Oj3l	-	-	120	-	[17]
да-	Моноклинная	Ц Ⅱ [a]	4,2	**e = —2,5 К**	[17]
	—	—	3,08	**e** = _ 5 **К** ауд(0 К) = 1,45 А-м^/кг	[91]
	Орторомбическая ***d***]^	НКС	3,1	a ^ O	[3]
	Кубическая	-	1**,35***^	**e = _ 3 , 3 К**	[17]
NKHCOO,.	Моноклинная	nil (100)	15,7*2	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, ***d = 2***	[17]
	Тетрагональная ***c***||^	mi C	2,37	(ХоЯ^ц = 3,5 Тл (ХоЯ^(1,46К) = 2,2 Тл	[17]

" Из измерений теплоемкости.
« При этой температуре упорядочиваются магнитные моменты тс амагнкшые свойства при температуре ниже *Tj*^. При *Т* ••

Вещество	Структура		К	Дополнительные сведения	Литера-тура
	криста л лографическа я	магнитная			
CuO	Моноклинная ***C^***		230		[17]
CUF2	Моноклинная Og^	**нкс** ЦП (а, ***Ь)*** б Ⅱ (010) (2а, ***Ь, с)***	69—70	6 = — 200 К Суд с1 А • м2/кг	[3, 17]
CUCl2	Л^оноклинная Cg^	-	23.9	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, ***d***= 1	[92]
CuBrs	Моноклинная ***C^***		74	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d= 1; | ***J'/J***|= = *7* • 10-2	[92]
Cu^Se	Тетрагональная	-	373	6 = — 1694 К, p = 4 3	[17]
KCuFs	Тетрагональная вЦ	nil ***(а, Ь)*** А-тип МП	***B8-DII 22-Dl^***	l^cu.^ (4,2 К) = 0,45[.^, для Dfft [^Cu=+(4,2 К) =0,541Л^ для ОЦ	[3, 17]
CsCuCls	Гексагональная или D|	ГС, ко Ⅱ С	10,7	[Лси.+ (4,2 К) = 0,58[.£	[93]
CUSO4	Орторомбическая ***D^***	fi Ⅱ [a]	35	К) = 0,831л^	[3, 17]
CuSeOi	Орторомбическая Dg®	ФВ'в^(001) АФВ между (001)	34	lЛси.+ (7,2 К) = 0,91Лд	[3, 17]
GdCu04	Тетрагональная D^^	-	3 - 5	6 = — 15 К	[94]
CUWO4	Моноклинная	-	90		[3]
LagCuO^	Орторомбическая	ИХ [6]	240		[123]
СиСЬ-гНаО	Орторомбическая Dg/j	И Ⅱ ***[a]*** (а, ***Ь, 2с)***	4,3	6 = 5 К f^o//c\l = 0,65 Тл	[2, 3]
СиО^-гОгО	Орторомбическая D^^	***li Ⅱ [a]***	4,3	-	[17]

Ooe структуры наблюдались одиовременио.

продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура		К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
	-	-	270	-	[17]
i'BasCuOe	Тетрагональная	(ill с	500	р.=0,48±0,05р.д	[124]
:uSi03-2H20	-	-	21*1	-	[17]
.iCuCl3 • .2HsO	Моноклинная *С^^*	**ЦН** (101)	5 - 6	0 = _ 10 К, **Р** = 1,8 **X**М(ГЛ,)/47**Г**=30**X** X 10-® см®/моль = 1 , 0 Тл*2	[3, 17]
:US04-5HSO	Триклинная *с]*	-	0,029*1	-	[17]
:uSe04-5H20	-	-	0,046*1	-	[17]
	-	-	0,45	**X**М(ГЛ,)/47Г = 65**X** X 10-3 см3/моль	[17]
	Моноклинная *С^*	-	1,86	е = _ 10 к	[17]
	Моноклинная		17	е = —175 к, °м(0 к) = = 0,15 А.м2/моль Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, *d = 2*	[17]
	-	-	0,05	–	[17J
« W A V	–	-	250-280	–	[17]
s r * ' -	Орторомбическая	fi Ц (а, Ь) *а {IX,*	2,21	Магнитные свойства соответствуют модели ферромагнитных цепей 1 J'/ / 1 = = 10-3	[95]
	Орторомбическая *П^*	**nil (0. *b)* И) = 25-**	1,5	Магнитные свойства соответствуют модели ферромагнитных цепей U'/ / 1 = 10-3	[95J

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
(с л т ,) , .	Орторомбическая *оЦ*	ФВ в (a, Ь) АФВ между (a, Ь)		Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, *d = 2* = 8 . 10-2 Тл (между слоями) = 50,0 Тл (внутри слоя) 0,16 Тл = 1,2 . 10-2 Тл	[17,96]
	-	—	0,37«	6 = - 1,2 К	[17]
	Моноклинная	-	1,4	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, d = 1	[17]
MoP3	Кубическая	-	185	-	[17]
AgF,	Орторомбическая D^	ц Ш (100) «(ti, [c]) = 0,5° о Ш *lb]*	163		[3]
Ce	Гексагональная Dg„	Ферримагнитное упорядочение в плоскости, перпендикулярной *С,* и АФВ между плоскостями, перпендикулярными С	**13**	е = — 46 К	[12, 14]
CeS	Кубическая	**п"тип'мп**	*7*	**е = —45 к, p=2,57** **l^ce (4,2 К) = 0,57(X_3**	[3]
CeZn	Кубическая		29-36	**е = - 18-^ - 2 К , Р=2,3**	[13]
CeSb	Кубическая (тетрагональные искажения при Г<Гд,)	Изменение структуры при **Г=15,5;** 14,9; **13,5;** 8,4 К	16-18	***р*** **=** **\,*58***	[3, 17]
CeBi	Кубическая	Н_ Ш [001] I тип МП	25-26	в = - 1 2 К, **р** = 2,38	[3,17]
CeC,	Тетрагональная *оЦ*	цЦС I тип МП	**33**	6 = 2,54, 1х^,(4,2 К)=1,74,х^	[3]
CeAIa	Кубическая	Несоизмеримая СВ	3,9	= 0,71*2	[97]
CeZn^	Орторомбическая D^l		7,5		[3]
CeCIs	Гексагональная	-	0,345	-	[17]

Из измерений [58. с. 74—7а], результаты
Магнитные характеристики CeAl^ i амагниченности в сильных магнитных полях пред-

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура		K	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая				
CeBв	Кубическая (струк-тура типа CaBe)	н к с	2,3	(Лее (1.3 К) = 0,7(Лз Магнитные свойства соот-ветствуют модели кондо-решетки	[99]
CeTiOs	Орторомбическая Dg®	G-тип МП (Ti) F-тип МП (Ce)	116	(Лсвv^ (81 К) = 0,4(x^j (81 К) = 0,36(x^ Металлическая проводи-мость при Т> 100 К	[59]
	Тригональная	-	0,0063	-	[17]
Pr	Гексагональная	-	23-35	Чистые монокристалличес-кие образцы не имеют чет-кой магнитной структуры	[3]
PrAg	Кубическая	С-тип МП (2а, *2b, с)*	11—14	(4,2 К) = 2,1(Лд	[3]
PrMg	Кубическая	-	45-47	в==-10 К, Р=3,4	[13]
PrQ	Тетрагональная пЦ	I тип МП f^11C	15	(хр^(4,2 К)=1,14f.^	[3]
PrClg	Гексагональная	-	0,7	-	[17]
PrSns	Кубическая	А-тип МП *{a, a, 2a)*	8,6	в = - 8 К	[3]
PrBe	Кубическая	-	6,9«	Металл Р(300К)= 15- 10-'0м.м	[17]
PrAlOg	Орторомбическая *D^*	-	-	е = - 100 К	[17]
PrCojSij	Тетрагональная *ПЦ*	f^11C	31	t-Pr(4.2 К)=3,19(Л^	[100]
Nd	Гексагональная	ФВ в плоскости, перпенди-кулярной С, и АФВ между плоскостями, пер-пендикулярными С (из-менение структуры при	19	е = —16 к	[12, 14]
NdMg	Кубическая *01*	-	48—64	е = —11 к, р = з,7	[13]
NdAl	Орторомбическая *D^*	НКС (2с, *b, с)*	29	е = - 4 к (4,2 К) = 2,7^3	[3]

•! Из иялерений теплоемкости.

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	„аг™™ая			
NdP	Кубическая	I тип МП fi Ⅱ [100]	-	(4,2 К) = 1,8,х^	[3]
NdS	Кубическая	**и к с** [1U]) = 24°	-	в = —24 К, р = 3,62	[3, 17]
NdAs	Кубическая	I тип МП Ⅱ [100]	-	(XNd3+(4,2 К)=2,13(х^	[3]
NdSe	Кубическая 0|	II тип МП |я|[111] ***(2а, 2а, 2а)***	14	в = —9 К, р = 3,5 К) = **1,57,**Х^	[3, 17]
NdAg	Кубическая	-	22	**е = - з К,** р = **з,б**	[13]
KM1n	Кубическая Oj^	-	66-148	**6 = 35 к, р = 3,3**	[13]
NdTe	Кубическая	II тип МП Ⅲ Ⅱ [111] (2а, ***2а, 2а)***	13	**6 = — 14 к, р** = 9,8 К) = 1,1^3	[3, 17]
NdSb	Кубическая 0| (тетрагональные искажения при низких температурах)		10—16	6 = —3 К, р = 3,75 [ХоЯс= 10,5 Тл К) = 2,99,х^	[3, 17]
NdBi	Кубическая 0|	I тип МП Ⅲ Ⅱ [0011	25	0 = —1 К, р = 3,58	[3, 17]
NdCa	Тетрагональная оЦ	I тип МП till С	29	(XNd(4.2 К)=2,95[Хд	[3]
NdCls	Гексагональная	-	1,035	-	[17]
Ndlna	Кубическая	С-тип МП ***(2а, 2а, а)***	7	в = —17 К, р = 3,7	[3, 13]
NdSng	Кубическия 01	А-тип МП ***(а, а, 2а)***	4,7	в = —22 К, р = 3,6	[3, 13]
NdPbg	Кубическая ***01***	-	2,7	**е = —23** К, **р = 3,6**	[13]
Nd(OH)3	Гексагональная	fill С	1,7«	-	[17]
NdVOs	Орторомбическая ***D^***	С;,-тип МП	132	р = 3,32	[3]

« 7-^ = 0.265 К [101].

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
NdFejSij	Тетрагональная	КС	16	Слабый ферромагнетик при Гд, < Г < Гс 690 К	[3]
NdRh4B4	Тетрагональная (кристаллическая структура типа CeCo4B4)		1,31	0 = —6,2, р = 3,58 Сверхпроводник при *Тс.* <5,4 К	1102]
Sm	Ромбоэдрическая	^Н с (изменение структуры при Г = 14 К)	106		[12, 14]
SmClg	Гексагональная	.	0,4	.	[171
SmRh4B,	Тетрагональная (кристаллическая структура типа CeC04B4)		0,87	0 = — 1,93 К, р = 0,63 Сверхпроводник при *Т* < <2,72 Д, ^ =	
Eu	Кубическая	ГС ко Ⅱ [100]	87-91	р = 8	13, 12, 14]
EuSe	Кубическая	**нкс**	4,6	Полупроводник, ферромагнетик при Г< 2,8 К	[3, 17] •
EuTe«	Кубическая	II тип МП Ц||[П01 *(2а, 2а, 2а)*	8-11	0 = -7,5 К fXoW^ = 7,5 Тл	[17]
EuFg	Кубическая	.	2: 19,5*2	.	[17]
EuA	Орторомбическая	.	5,3	(XoЯc = 0,2 Тл	[17]
EuTiOg	Кубическая	.	5,2	= 1 *Л* Тл п° = 6,93	[17]
EuGdjOi	Орторомбическая	.	4,5	.	[17]
GdP	Кубическая	.	15	**е** = -2 **К** [x„//^ = 7,5 Тл	[17]
GdS	Кубическая	II тип МП ti 1l(111) (2а, 2с, 2а)	50	_	[3. 17]
GdCu	Кубическая Oj^	.	41—140	в = -75---26 К, Р = 8,4	[13, 17]

" Магнитные свойства образцов EuTe коррелируют с удельным электрическим сопротивленнем, которое может изменяться в широ-

1 [104].

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
GdAs	Кубическая (тригональные искажения при *T< T^)*	—	19-25	в = -12 К, р = 8,2 (ЛоЯ<,= 18,0 Тл	[17]
GdSe	Кубическая of	II тип МП till (111) (2а, *2а, 2а)*	60	-	[3, 17]
GdAg	Кубическая Oj,	—	138—150	е = _84ч- -70 К, р = = 8,2-4-8,8 Хм(7'Л)/47С = 40- 10-3 см^/моль	[13, 17]
Gdin	Тетрагональная	-	28	в = — 66 — 18 к, Р = 8,1 Хм (7'л?)/4^= 73,5- 10-3 СМЗ/МОЛЬ	[13, 17]
GdSb	Кубическая	II тип МП (I Ii (111) (2с, *2а, 2а)*	28	в =—42 к, р = 8,1	[3, 17]
GdTe	Кубическая Of	-	80	-	[17]
GdBi	Кубическая 0|	II тип МП f^ Ii (111) (2с, 2а, 2а)	28—32	р = 8,3	[3, 17]
GdCua	Орторомбическая	-	41	е = 11 К, Р = 8,4	[17]
GdCoOs	Орторомбическая *D^^*	А-тип МП (Gd)	2,9 fGd)	t^Gd	[3]
GdAlOs	Орторомбическая	Ii [b]	3,87	е = —4,81 к, (Ло//,|,(0,5К) = 1,1 Тл«	[17]
GdVOs	Орторомбическая	-	7,5	р = 8,0	[17]
GdV04	Тетрагональная	-	2,49	При комнатной температуре обладает ферромагнитными свойствами	[105]
Gd(OH)3	Гексагональная	I-II С	2,0	-	[17]
Gd„2MOeS8	Ромбоэдрическая	-	0,8-0,9	Сверхпроводник при Г< 1,4 К	[108,109]
SrGd204	Орторомбическая	-	2,8	е = —6 К	[17]
GdClg-eHaO	-	-	0,182*2	-	j[17]

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура		*TN-K*	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	**магнитная**			
Тъ	Гексагональная Dg^	ГС при 216 К<Г<Тд, НJ с	229—230	Фе^ртмагнетик при	[3, 121
TbAI	Орторомбическая D^^h	и к с (2а, ***Ь, с)***	72	В= 1О-f-24 К, Р= 10 ,х^b(4,2К)=8,8(Xj3	[3, 13j
ТЬР	Кубическая	II тип МП 1Ч1[1И1 (2с, ***2а, 2а)***		6 = 1 к, р = 9,2, ***п, = 8*** [Х,Яе = 0,43ТЛ 1^пъ=+ = 6,2 [Xj3	[3, 17]
TbCu	Кубическая	С-тип МП |a ll (001) (2а, ***2а, а)***	177	е = —20К, р = 9,6	ГЗ, 13]
TbAs	Кубическая	**II тип МП** 141 [111] (2а, ***2а, 2а)***	10—12	в = —4К, р = 9,7 и, = 7,9 ,х„Я, = 2,8Тл	[3, 171
TbSe	Кубическая ***0***	II тип МП (.11 [111]	52	6 = -53,5 К, Р = 9.8	[3]
TbAg	Кубическая ***0***	С-тип МП ll [001] ***(2а, 2а, 2а)***	100-106	е = -36ч--11 К Р==9,44- 10,1	[3, 131
TbSb	Кубическая 0|	II тип МП till [111] ^^ ***(2а, 2а, 2а)***	14-17	е = —14К, Р = 9,7 «5= 7,5 (ЛоЯс = 6,0 Тл Рт-Ьа+(0К)=8,2(Хд	[3, 17]
TbBi	Кубическая	II тип МП (Л ll [111] (2а, ***2а, 2а)***	18	в ==-33 К, р = 9,52 К) = 7,9,xj3	[3, 17]
TbD,	Кубическая	f^ 11Г001]«	40	(х^(4,2 К) = 7,9 (Xj3	[3]
TbQ	Тетрагональная	ГС, к„||[с] (изменение структуры при ***Т^ЗОК)***	66	К)=5,2,xj3	[31
TbO,	Кубическая	11 тип МП (Л ll (111) ***(2а, 2а, 2а)***	3	Р = 7,8 =6,25 (Xg	[3]
TbCu2	Орторомбическая	-	54	в = —6К, р = 9,8	[13, 171
TbAg2	Тетрагональная ***ОЦ***	ФВ в (100) АФВ между (100) (2й, ***2а, с)***	35	е = —32К, п^ = 8,95	[3, 13]

I Соизмеримая СБ, распространяющаяся вдоль [001] с периодом х = 2.4 нм.

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	крис таллографическа я	магнитная			
TbZn^	Орторомбическая ***D^l***	НКС при < Г < Гд, КС при Г < = 60 К*' ***(x||Ь1,(a, b, 2c)***	75	,x^ь(4,2К) = 8,8	[3]
TbAua	Тетрагональная ОЦ	(Л Ш ***С*** при Г < Г„ = 42 К*2	55	6 = - 2 1 К, р = 9,8 (4,2 К) = 9ixj3	[3, 13]
IbPtg	Кубическая	ФВ в (1П) АФВ между (111) (2с, ***a, a)***	20—22	**е** = 1 7 К, **р** = 9,**9** ***ns = 8,4***	13, 13]
а-ТЬ^Сз	Кубическая	ti Ш [001]	33	« 5 = 9	[3]
ТЬ.Оз	-	-	2,4	в = —13К, Р = 9,67	[17, 108]
TbsNi	Орторомбическая ***D^***	НКС (2а, ***Ь, с)***	62	**е = —5К, р** = 1 0	[3, 13]
TbgNd	Тригональная Dg^	***ЦМС***	129	Ферромагнетик при низких температурах	[3]
Tb4La	Тригональная D®^	***мС***	124	M-Tb =6,8[Xj3	[3]
Tb4Pr	Тригональная	***ti ±С***	,3.	Ферромагнетик при Г<30К	[3]
TbOCl	Тетрагональная D^^	(2"V^a, 27/20, 4 с)		Р = 9,84	[3J
ТЬАЮз	Орторомбическая ***D^^***	НКС ***а (lb. [a]) =34°***	3—5	(x^b(1.5K) = 8,25(Xj3	[3]
ТЬУОз	Орторомбическая D^f^	КС(V) НКС (ТЬ)		К) = 7,6(xj3 ixy (4,2 К) = 1,3,x^3	[3]
ТЬСоОз	Орторомбическая ***D^^***	НКС a (11, [a]) = 3 3 °	3,3	(iTb (1,5 К) = 8,0(xj3	[3]
ВаТЬОз	Тригональная	КС	36		[3]
TbCogSia	Тетрагональная	**КС, ti Ш с**	46	К) = 9,I2(x^3	[100]
	Ромбоэдрическая		1,0	Сверхпроводник при ***Т*** < <2,05 К Ферромагнетик при ***Н*** > > (0) Ь'о/^тг (0) = 0,19 Тл	[106, 107, 109]

Гц = 5 5 К [13]

' **При Г д С Г< Гдг несоизмерЬ^** ляризованиая вдоль оси [с] и распространяющаяся вдоль оси [а].

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура		г^v. К	Дополнительные сведеиня	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
Tb^O^S	Тригональная ***D^***	mi [110] (a, ***2a, 2c)***	.	6 = - 1 7 К, (Лт.ь(1,5К)- = 8,36	[3]
TbsO^Se	Тригональная ***Г^***	а(ц, 0 ^ 3 0 ° (с, ***2a, 2c)***	7	е = - 1 8 К, (1,5К)=	[3]
TbaAbOia	Кубическая	НКС	1,5	.	[П. 17]
Dy	Гексагональная D^	ГС при ***Tc<T<Г^*** = 90 ***piXC***	175-184	е = 153 К Ферромагнетик при ***Т СТ^***	[3, 12, 14]
DyP	Кубическая 0|	НКС при Г = 1 , 8 К		6 = 6 К, р = 9,9 «5 = 7,8 1,7 Тл	[17]
DyCu	Кубическая Of,	а) КС, С-тип МП*1	61-64	е = - 2 6 - — 1 8 К, р= 10,7 = 10,6(Xj3	[3, 13]
DyAs	_		8,5	0 = 2 К, р = 10,4 «5 = 8,1 [ХоЯ^ = 3 , 2 Тл	[17]
DySb	Кубическая	ФВ в (111) АФВ между (111) \lit ll 1001] (2с, ***2a, 2a)***	9,5	е = — 4 К, р = 1 0 , 7 «5 = 7,7 1ХоЯ<;= 1,95 Тл (Лоу(5,8 К)=9,4(лз	[3, 17]
DyBi	Кубическая	II тип МП (2с, 2с, 2а)	12-13	в = —30 (xj^(4,2 К) = 8,7(XJ3	[3, 17]
DyQ	Тетрагональная D^^	***1П***	59	(XDy(4,2K) = 8,37(Xj3 11,8	[3]
DyCua	Орторомбическая	.	24	И = 5 К, р = 10,75	[13, 17]
DyGa,	Гексагональная D^	КС, ***11 \\ [b]*** _ ***(a, a, 2V3 c)***	15	е = - 6 К, Р = 10,7 (ЛПэу(4,2 К)=7,5(xj3	[3, 13]
DyAg,	Тетрагональная оЦ	***При*** Г д , > Г > Г п = 9 К несоизмеримая структура*2, при Т < Т п соизмеримая структура	15	е = - 2 5 К, р = 1 0 , 5 (ЛоЯ^ц = 3 , 5 Тл*з (^Оу(Ь7 К)=7,4(Л£	[3, 13, 17]

" Возможные структуры.
Несоизмеримая поперечная СВ, распространяющаяся вдоль оси [о].
Поле опрокидывания подрешеток.

Продолнете табл. 28.1

Вещество	Структура			Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
DyAua	Тетрагональная ***ОЦ***	При ***T^>T>T^*** = ***2Ъ*** К несоизмеримая структура*!, при ***TcTa*** соизмеримая структура	—	е = — 1 з - ^ - 2 4 к. ***р*** = = 10,5 (Лоу(1,7 К) = 9,2,х^з	[3, 13, 17]
Dying	Кубическая	ФВ в (110) АФВ между (ПО) а(1и, [001]) = 27,5° **(с, *а*, *2а)***	23—24	6 = - 3 5 К, р = 10,8 (Лоу(4.2 К) = 8,8,х^з	[3, 13]
DyPtg	Кубическая	II тип МП ***{2а, 2а, 2а)***	13	l-Dy = 9,0(Xj3	[3, 13]
DyBe	Кубическая (О.Ц.К.)	-	20,5	е = —21К, р = 9,43	[110]
DyOOH	Моноклинная	ФВ в (010) АФВ между (010) nil (010) « (lit, [с]) = 80°	—		[3]
DyOCl	Тетрагональная	И Ⅱ (001) ***(а, а, 2с)***	9	***l^oH,*** (4,2 К) = 1,4 Тл	[3. 17]
DyAlOs	Орторомбическая Dgft	ИКС а(1и, [а]) = 57^	3,4-3,5	,хру(1,5 К)=8,2(XJ3	[3, 17]
DyCoOs	Орторомбическая ***оЦ***	а(1и, [а]) = 60°	3,6	Ионы Со диамагнитны из-за сильного кристаллического поля;,хру(1,5К) =8,8(х^з	[31
DyP04	Тетрагональная	G-тип МП lit Ⅱ С	3,4	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, d = 3 (1,8 К) = 9,0(л^з	[3, 111]
DyVO,	Тетрагональная	Ⅱ ***т***	3,0	fXDy(1,85 К) = 9,0^tj3	[3, 17]
DyAs04	Тетрагональная DJ®	НКС fi Ⅱ (007)	2,5-2,8	Ферромагнетик при 7 < Г с = 1 1 К	[3]
Dy,,2M0eS«	Ромбоэдрическая	р II1111]	0,4	**Сверхпроводник при (X5/^J(0) = 0,12 ТЛ Ферромагнитная компонента при (ХоЯ > 2 • 10-2 Тл ^iDy(0,07 К)=8,77|XJ3**	**[107, 109, 112]**

• Несоизмеримая поперечная СБ, распространяющаяся вдоль оси [а].

Продолжение табл. 28.t

Вещество	Структура		*TN.K*	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
Dy^O^S	Тригональная	HIKIIOJ (a, ***2a, 2c)***	5,85	e = - 1 4 , 8 K |Xoy(1,5 K) =4,41,Xj3	[3J
Dy^OaSe	Тригональная Dg^	lit Il C ***{a, 2a, 2c)***	8,5	K) = 9,0(Xj3	[3]
DygAlsOia	Кубическая	н к с «	2,5	t-Dy3+('.3K) = 9,0(Xj3	
Ho	Гексагональная Dg^	ГС, ко 11 С п р и Г д , > Г > > Г с = 20 к	130-133	При ферромагнит-ная спираль	Bi
HoSi	Орторомбическая D^	КС, ПН [103] (2a, ***Ь, 2c)***	25	e = 2 K , p = 1 0 , 6	[3, 13]
HoAs			4,8	e = 1 K , p = 10,5 я , = 9 ,0 (Ло//л = 0,18 Тл {^0cHc2 = 0,6 Тл	[17]
HoRh	Кубическая	А-тип МП Il (001)	3,2	e = — з к , p = 1o,4 |Хно(1,2 К) =5,2^1J3	[3]
HoSb	Кубическая	II тип МП II Il [100] (2c, ***2a, 2a)***	5—9	e = —2 ,4 K , p = 1 0 , 8 ***n, = 8,T,*** ***(ХоЯ^*** = 1 ,5 Тл,	[3, 17]
H0D2	Кубическая 0|	и к с	8	p = 9,9	[3]
Hoc,	Тетрагональная оЦ	ГС, ко Il ***la]***	26	,хн„(4,2 K)=6,89(xj3	[3]
HCCU2	Ортогональная D^^	-	9	0 = - 6 K, p = 10,5	[13, 17]
HoGaa	Гексагональная	КС, п н е (2c, ***У^а, c)***	10	e = — 2 K , p = 1 0 , 7 (хн„(4,2 K) = 9,5(xj3	[3, 13]
HoAga	Тетрагональная оЦ	' Несоизмеримая СВ*^, распространяющаяся вдоль оси [c]	5 - 8	**e** = - 1 3 , 5 **K**	[3, 13]
HoAu,	Тетрагональная ВЦ	ИКС	9	e = — 8 , 0 K , p= 10,97	[3, l3.1

-1 Магнитная структура представляет собой три группы взаимно ортогональных вложенных друг в друга направленных вдоль или против осей [100], [010] и [001].
= Прн Г >Г = 4,7 К продольная поляризация, при Т < Т поперечная поляризация, параллельная оси С.

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура		*TN.* К	Дополнительные сведения	Литера-тура
	криста ллографическа я	магнитная			
Hc1пз	Кубическая 01	ФВ в (ПО) АФВ между (110) (2а, ***а, 2а)***	11	е = — 1 8 К , р = 10,65 fXH,s+ (4,2 К) = 9fX£	f3, 13]
а-НОгСз	Кубическая Т^	F Ⅱ [111]	19	р = 8,7 f^Но =	[3]
НоСоОз	Орторомбическая оЦ	ИКС а (ц, [а]) = ±63°	2,4	Ионы Со диамагнитны из-за сильного кристаллического поля txНо(1,5 К) = 7,0f.B	[31
НО2О2S	Тригональная	КС, ЦП С (а, 2а, ***с)***	2,5	е = —8 К fXНо(1.5 К) =7,9^^5	[3J
Но^О^Se	Тригональная ***D^***	КС, рП С ***(е УЪ , а, с)***	4	1Хно(1,5К)=9,3,Лд	[3]
Er	Гексагональная Dg^	При Г > 5 2 К*1 рНС, при 20 < Г < 52 К ц Ⅱ С и fi _ С	79-86	При Г < Г с = 20К фер-римагнитная спираль	[3, 12, 14]
ErA1	Орторомбическая оЦ	ИКС (а, 26, ***с)***	10-13	е = 2 5 К , р = 9,7 fXE,(4,2 К) = 7,0fx^3	[3, 13]
ErSi	Орторомбическая Dg^	КС ***(2а, Ь,*** 2с)	10	е = - 5 К , р = 9 , 3 8	[3]
ErP	Кубическая	U тип МП ft • [111j	3 - 4	е « s О К , р = 9 , з «5 = 8,5, (ХоЯе = 0 , 5 2 Тл (^Er =	[3, 17]
ErAs	_	—	3,5	в = - 1 , 5 К , р = 9.6 « s = 8,4 НоЯ^ = 1,05 Тл	[17]
ErSb	Кубическая	fi J- [1П] (2fi, 2а, 2о)	3,5-3,7	е = - 3 К . Р = 9,6, « 5 = 7 , 3 Н о Я с = 1 , 2 Тл	[3, 17]
ErRh	Кубическая Oj,	А-ТИП МП Ⅱ (001) (0, ***а, 2а)***	3,3	е = - 4 К. Р = 9,4 (Xg^ (1,2 К) = 6 , 1 ^ £	[3, 13]
ErC,	Тетрагональная оЦ	Набор несоизмеримых СВ при Г > 10 К*^	19	fiE,(2K)=7,9fx^3	[3]

' При 52 К < 7" < Гдг продольная СВ, распространяющаяся вдоль *С* с полупериодом атомных слоев; при Г < 52 К Добав. я компонента намагниченности в плоскости, перпендикулярной осн *С*.
При Г < 10 К вклад в магнитную структуру дает соизмеримая антиферромагнитная С

Продолокение табл. 28.1

Вещество	Структура		*m^.K*	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
ErClb	Орторомбическая	-	11	e = 4 K . p = 9.35	[13. 171
ErAua	Тетрагональная	Ил1 [Ь]«	6,7	e = — 4 K , p = 9,45 FEr = 9 . 2 F £	[3, 13]
a-ErA1з	Тригональная	КС, *11*11 с (2a, *2a,* с)	5 - 6	(2,15 K) = 6,15f.B	13, 13]
P-ErA1з	Кубическая	С-тип МП ц Ⅱ (001) (2a, *2a, a)*	5	e = — 1 6 K , p = 9,87 n^ = 6,25 ixg^st (4,2 K) = 5,1.лд	[3]
ЕПгз	Кубическая о1	С-тип МП *(2a, 2a, a)*	6	6 = — 1 0 K, p = 9,75 n, = 7,3	[3, 13J
Er,Оз	Кубическая Т^	н к с	3,4	e = - 1 1 K. p = 10,5 (1,25 K)=6,06(X5 !^Er3+ii(1.25 K) = 5,36tx^,	13, 17, 108]
ErзCo	Орторомбическая D^^	НКС („ „ и ^ ^ с ^ у к х у р .	13	e = 2 0 K . FEr1 = = f . E , i , (4 . 2 K) = 6,4fx^j	[3, 13]
ErsNi	Орторомбическая	НКС «(ft, [a]) = 2 9 ° *(2a, 2b. c)*	5—9	e = - 6 K , p = 9,8 K) = = 6,9.U£ (x^i (4,2 K) = 0	f3, 13]
ErOOH	Моноклинная	КС, ц\1[Ь]	-	K) = 7,14^^3	[3]
ErVOs	Орторомбическая *D^^*	t^v Ⅱ [Ь] (^Er Ⅱ M	20 (V) 16 (Er)	Fv (4.2 K) = l,2fx^3	[3]
LaErOg	Орторомбическая *D^*	НКС	2,4	p = 9,45 FEr (1,5 K) = 6,34,x^з	[3]
Tm	Гексагональная Dgft	ц Ⅱ *C* при 40 К < *ТСТ*^^	56	При *Т* < Тс = 40 К ферримагнитное упорядочение	[12, 14]
TmAl	Орторомбическая *D^*	НКС *(2a. Ь, с)*	11	0 = - 2 K , Нтш1 = = FTmii (4,2 K) = 5,5fx^j	[3]
TmSi	Орторомбическая *D^I*	КС (а, *Ь, 2с)*	10	0 = 10 K, p = 7,45 (4,2 K) =	[3, 13]

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура		•*TN* . к	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
TmAUa	Тетрагональная	-	3,2-3,5	р = 7,62	[3, 13]
Yb,03	Кубическая Г^	н к с HYbiilltlOl]	2,3	fXYb,(l,25K) = l,05fx^3 f^Ybii(b25 К) = 1,86,хд	[3]
Yb.O^S	Тригональная D^^	КС F Ⅱ [110]	3	е = —6,5 К f^(1,5 К) = l,66fXB	[3, 17]
Yb,0,Se	Тригональная Е^^	КС, р . *с*	-	f.Yb(1.5 К) = l,6fXB	[3]
KaReCle	Кубическая	I тип МП	l2	К)=2,6,хв «s = 2,6	[3, 17l
KaReBre	Кубическая 0|	I тип МП Ⅱ (001)	15,3	-	[3]
KalrClg	Кубическая	III тип МП (а, ***а, 2а)***	3,0	е = —32 к	[3, 17, 113]
Rb^IrCle	Кубическая	-	1,8	е = - i 7 к	[113]
Cs,IrCle	Кубическая	-	0,5	fl = — 4 К	[113]
(NH4)2lrCle	Кубическая Од	-	2,15	е = —20 К	[ИЗ]
UN	Кубическая ***о***\	I тип МП	50-55	е = —200-^-—300 К, р=3 [ХЦ= (4,2 К)=0,75f.£	[1, 3, 114]
UP	Кубическая	-	122-125	6 = 49 К, р = 3,3	[17, 114]
UGa	Ромбическая	-	27	-	[114]
UAs	Кубическая	I тип МП [Ч Ⅱ [001]	128	6 = 32 К, 1хц=1,89{лд	[1, 3, 17, 114]
USb	Кубическая 0®	I тип МП	213-246	6 = 95 К, р = 3,85 (4,2 К) = 2,6^^з	[1, 3, 114]
UBi	Кубическая	-	285-290	6 = 115 К	[114]
u o .	Кубическая	И1)[1И]«	28—31		[3, 17]

трехлучевая магнитная структура с ориентацией магнитных моментов пространственных диагоналей куба [115].

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура		*TN*-К	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
UP,	Тетрагональная	fill C (a, ***a, 2c)***	203-206	6 = 30 К, p = 2,4 (80 К) = ***2,01.^***	[3, 17]
иМпг	Кубическая	-	260	-	[114]
UAs,	Тетрагональная D^	НИ С ***(a, a, 2c)***	283	6 = 34 К, p = 2,9 (4,2К) = 1,6,x^3	[3, 114]
use.	-	-	11-13	-	[114]
USbs	Тетрагональная D^	НПС (a, a, ***2c)***	206	**e = 18к,** p = **3,0** fXu (80 К) = 0,94fx^3	[3, 114]
UHgs	Тетрагональная ***C^f^***	-	70	-	[114]
UBi,	Тетрагональная ***dI^***	НИ С	183	6 = -53 К, P = 3,4 fxy (80 К)=2,1(x^3	[3, 17]
иОаз	Кубическая	G-тип МП ***(2a, 2a, 2a)***	70	fxu (4,2 К) = 0,72^^3	[3, 114]
Шпз	Кубическая	G-тип МП (2a, ***2a, 2a)***	95-100	6 = —215 К	[3, 114]
иТез	-	-	56	-	[17]
иТ1з	Кубическая	О-тип МП (2a, ***2a, 2a)***	80-90	6 = -150 К, Fu (4.2 К) =	[3, 114]
иРЬз	Кубическая	ФВ в (001) АФВ между (001) Н Ⅱ [001] ***{a, a, 2a)***	32		[3, 114]
UPdj	Кубическая	КС, ft Ⅱ (001) (2a, ***2a, a)***	10-30	6 = -130 К, P = 3,47 Fu ~0,8fX£	[3]
UCU5	Кубическая ***T^***	**КС, ц (111)** ФВ в (111) АФВ между (111)	15-16	Fu (4,2 К) = 0.9,л^	[3, 114]
и л	Кубическая ***T^***	-	94—96	-	[114]
UOS	Тетрагональная	НИ С (й, ***a, 2c)***	й	**e = —51 К** Ни (4,2 К) = l,9fXB	[3]
UOSe	Тетрагональная	НИ С	72	**e = —20 —130 к** p = 2,87 ***1x^(4,2*** К) = 2,21x^3	[3]

продолжение табл. 28. **i**

Вещество	Структура		TN- К	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллографическая	магнитная			
иОТе	Тетрагональная	1141 С	157-160	е = -56 - -60 К Fu (78 К) = 2.7,Хд	[3]
	Тригональная D^	КС, mi с	366	(хц (4,2 К) = IJi^B	[3]
	Тригональная Е^	КС, и II с	233	fxy (4,2 К) = 1,3|лв	[3]
U^N^As	Тригональная D^	КС, in II **с** (а, а, 2с)	406	Fu (4,2 К) = 1,3[x^з	[3]
	Тригональная Dg^	КС, рЦС *{а, а, 2с)*	245	fxu (4,2 К) = 2,2^^3	[3]
NpC	Кубическая	_	310	р = 3,37 Ферромагнетик при Т<Тс= = 200 К	[17]
NpP	Кубическая	.	130	.	[П4]
NpS	Кубическая *0*	II тип МП	23*2	Р = 2,1 {-Np(4,2K) = 0,9t.£	[3]
NpAs	Кубическая	Продольная СВ при Г> > Гц = 150 К, 1 тип МП ц II [001] ири Г < Г п	177	(!^Np)max= I.Vb приГп< (X^p (4,2 К) = 2,5tx£	[3]
NpSb	Кубическая	I тип МП	207	f^Np (4.2 К)=2,51Хд	[3]
NpPt	Орторомбическая Dg^	.	27	.	[114]
NpO,	Кубическая о\	_	25,3	.	**[17]**
NpCo,	Кубическая *0*	.	15		[3]
NpAs,	.	.	180	.	[114]
Np1r,	Кубическая о\	.	7,5	.	[114]

В ферромагнитном состоянии.
« При *Т* = **фазовый переход** первого **рода.**

продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура		TN. K	Дополнительные сведения	Литера-тура
	кристаллограф ическая	магнитная			
NpPds	Кубическая	КС, О-тип МП *(2а, 2а, 2а)*	55	f^Np (4,2 K)=2,0,л^з	[3, 114]
NpSns	Кубическая 01	-	9,5	-	[114]
NpB4	-	-	52,5	-	[114]
PuN	Кубическая	-	13	-	[114]
PuRhg	Кубическая	-	6,2	-	[114]
PuPdg	Кубическая О/j	-	24	-	[114]
PuBe^з	Кубическая 0®	-	11,5	-	[114]
PU3S4	Кубическая j_i	"	10	-	[114]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вонсовский с. В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.

2. **Боровик-Романов** А. С. Итоги науки. Физико-математические науки. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 4. Антиферромагнетизм.

3. Oles A., Kajzar **M., Kucab W. e. a.** Magnetic structures determined by neutron diffraction. Warszawa: Krakow paiistwowe wydawnictwo naukowe, 1976.

4. Кринчик Г. **С.** Физика магнитных явлений. М.: **МГУ, 1985.**

5. Боровик-Романов А. С. Антиферромагнетики с анизотропией типа легкая плоскость//Проблемы магнетизма. М.: Наука, 1972. С. 47—58.

6. Александров К. С, Федосеева Н. В., Спевакова И. П. Магнитные фазовые переходы в галлоидных кристаллах. Новосибирск: **Наука, 1983.**

7. **Еременко** Б. В. Введение в оптическую спектроскопию магнетиков. Киев: Наукова думка, 1975.

8. **Туров Е. А., Петров М. П.** Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1969.

9. **Изюмов Ю. А., Найш В. Е., Озеров Р. П.** Нейтроны и твердое тело. М.: Атомиздат, 1981 Т. 2. Нейтронография магнетиков.

10. **Туров Е. А.** Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. М.: Изд-**во** АН СССР, 1963.

И. **Редкоземельные** ионы в магнитоупорядоченных кристаллах/А. К. Звездии, В. М. Матвеев, А. А. Мухин, А. И. Попов. М.: Наука, 1985. **Ориентационные** переходы в редкоземельных магнетиках/К. П. Белов, А. И. Звездин, А. М. Кадомцева, Р. З. Левитии. М.: Наука, 1979.

12. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма: Пер. с ЯП. М.: Мир, **1983.**

13. Buschow K. H. J.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam — New Yok — Oxford: North-Holland Publ. Сотр., 1980. Vol. 1. P. 297—414.

14. Legvold S.//Ibid. P. 183—295.

15. Keffer F.//Handbuch der Physik. Berlin. Springer, 1966. Bd 18/2. S. 1—207.

16. Morrish A. H. The Physical Principals of Magnetism. N. Y.: John Willey and Sons, Inc., 1965.

17. Ожогин В. И., Шапиро В. Г. Глава 30. Антиферромагнетики/Даблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 600—633.

18. Hurd C. M.//Contemp Phys. 1982. Vol. 23, N» 5. P. 469—493.

19. Bizette H., Tsai B.//Compt. Rend. 1954. Vol. 238. P. 1575—1576.

20. Stout J. W., Adams H. E.//J. Amer. Chem. Soc. 1942. Vol. 64. P 1535—1537.

21. Jacods J. S.//Appl. Phys. 1961. Vol. 32S. P. 61—

22. Shapira V., Foner S.//Phys. Rev. B. 1970. Vol. 1, N» 7. P. 3083—3096.

23. Low G. G., O Okazaki A., Stevenson R. W. H. e. a.// J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35, N» 3. P. 998—999.

24. Johnson F. M., Nethercot A. H. Jr.//Phys. Rev. 1959. Vol. 114. P. 705—714.

25. **Еременко** В. В., **Беляева** А. И.//Успехи физ. **наук.** 1969. Т. 98, вып. 1. С. 27—70.

26. Allen S. J. Jr., Loudon R., Richards P. L.//Phys. Rev. Lett. 1966. Vol. 16. P. 463—465.

27. Green R. L., Sell D. D., Yen W. M.//Ibid. 1965. Vol. 15, N» 6. P. 656—659.

28. **Харченко** Н. Ф., **Еременко** В. В.//Физика конденсированного состояния. Харьков: ФТИ низких температур АН УССР, 1971. Вып. XIII. С. 3-45.

29. **Боровик-Романов** А. С.//Журн. эксперим. **и** теорет. физ. 1959. Т. 36, вып. 3. С. 766—781.

30. Ожогин В. И.//Там же. 1970. Т. 58. вып. 6(6). С. 2079—2089.
31. Боровик-Романов А. С., Прозорова Л. А.//Там же. 1968. Т. 55, вып. 5(11j. С. 1727—1736.
32. Боровик-Романов А. С., Рудашевский Е. Г.//Там же. 1964. Т. 47, вып. 6(12). С. 2095—2101.
33. Боровик-Романов А. С., Крейнес **Н. М.,** Прозорова Л. А.//Там же. 1963. Т. 45, вып. 2(8). С. 64—70.
34. Ozhogin V. **I.,** Maximenkov P. P.//Digests of Intermag. Conf., Kyoto, 1972. P. 494; Seavey M. H.//Solid State Commun. 1972. Vol. 10. P. 219—221.
35. Боровик-Романов А. С., Крейнес Н. М., Жотиков в. Г. Проблемы магнитного резонанса. М.: Наука, 1978.
36. Borovik-Romanov A. S., Prozorova L. A.//J. Physiq. 1971. Vol. 32. P. CI—837.
37. Ожогии В. И., Якубовский А. Ю.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1972. Т. 63, вып. 6. С. 2155—2158.
38. Ozhogin V. I., Inyushkin A. V., Babushkina N. A.// J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 31—34. P 147—148.
39. Jakobs **I.** S., Lawrence P.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 996—999.
40. Gillot M., Eremenko V. V., Marchand A. e. a.// Proc. Intern. Symp. on High Field Magnetism, Osaka, 1982/Ed. by M. Date. Amsterdam — New York — Oxford: North-Holland Publ. Сотр.. 1983. P. 63—65.
41. Дзялошинский **И.** Е.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1957. Т. 32, вып. 6. С.1547- 1562.
42. Боровик-Романов А. С., Ожогии В. И.//Там же 1960. Т. 39, вып. 1(7). С. 27—36.
43. Ожогин В. И.//Там же. 1963 Т. 15, вып. 5. С. 1687—1690.
44. Ожогин В. И., Шапиро В. Г.//Там же. 1968. Т. 54. пып. 1. С. 96—108.
45. Крейнес Н. М.//Там же. 1961 Т. 40, вып. 3 С. 762—774.
46. Боровик-Романов А. С.//Там же. 1960. Т. 38. вып. 4. С. 1088—1098.
47. Боровик-Романов А. С.//Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 597.
48. Астров Д. **Н.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40, вып. 4. С. 1035—1041.
49. Hornreich R. M.//Digests of the Intermag. Conf. Kvoto, 1972. P. 40. 4.
50. Schmid H. Intern. J. Magnetism. 1974. Vol. 4. P. 337—361.
51. Ожогин В. И.//ИЗВ. АН СССР. Сер. физ. 1973 Т. 42, № 8. С. 1625—1637.
52. Буздин А. И., Булаевский Л. Н.//Успехи физ. наук. 1984. Т. 144, вып. 3. С. 415—437.
53. Morlensen K., Tomkiewicz Y., Bechgaard K.//Phys. Rev. B. 1982. Vol. 25, № 5. P. 3319—3325.
54. Scott **I.** S.//J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, № 3. P. 1845—1848.
55. Walsh W. M. Jr.. Wudl F., Aharon-Shalom E. e. a.//Phys. Rev. Lett. 1982. Vol 49, № 12. P. 885—888.
56. Смоленский Г. А., Недлин Г. М.//Физика магнитных диэлектриков. Л.: Наука, 1974. С. 8—34.
57. Белов К. **И.,** Соколов В. И./А'спехи физ. наук 1977. Т. 121, вып. 2. С. 285—317.
58. Физика и химия редкоземельных элементов: Справочник/Под. ред. К. Гшнайдера и Л. Айринга: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982.
59. Gorai J. P., Greedan J. E.//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 37. P. 3JS—321.
60. Wiedenmann A., Venien J. P., Palvadeau P. e. a.// J. Phys. C.: Solid State Phys. 1983. Vol. 16. P. 5339—5350.
61. Коидорский Е. И., Костиив Т. И., Галкина В. Ю.// Журн. эксперим. и теорет. физ 1975. Т. 69, вып. 5(11). С. 1753-1755.
62. Nishihara Y., Yamaguchi, Waki S. e. a.//J. Phys. Soc. Japan. 1983. Vol. 52, № 7. P. 2301—2303.
63. Tripathi A. K., Lai H. B.//Indian J. Pure and Appl. Phys. 1982. Vol. 20. P. 271—275.
64. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магиитных окислов: Пер. с нем. М.: Мир, 1976. Т. 1.
65. Yoshimura K., Nakamura Y.//J. Magnetism and Magnetic Materials 1983. Vol. 40. P. 55—60.
66. Oleveira N. F., Shapira Y.//J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50, N» 3. P. 1790—1795.
67. Gurewitz E., Horowitz A., Shaked H.//Phys. Rev 1979. Vol. 20. № 11. P. 4544—4549.
68. Zandbergen H. W.// J. Solid State Chem. 1981. Vol. 37. P. 189—203.
69. Rimet R., Buder R., Schlenker C. e. a.//Solid State Commun. 1981. Vol. 37. № 9. P. 693—697.
70. Kotlicki A., McLeod B. A., Shott M. e. a.//Phys. Rev. 1984. Vol. 29, № 1. P. 26—31
71. Phaff A. C., Swiiste C. H. W., KopingaK. e. a.// J. Phys. C.: Solid State Phys. 1983. Vol. 16. P. 6635-6649.
72. Simizu S., Chen L Y., Fridberg S. A.//J. Appl. Phys. 1984. Vol 55, N» 6, pt 2B. P. 2398—2400
73. Takeda K., Koyama K.//J. Phys. Soc. Japan. 1983. Vol. 52, № 2. P. 648-655.
74. Lhao M. G., Du M. L.//Phys. Rev. B. 1983. Vol. 28, NM1. P. 6481—6484
75. Ожогии В. И., Шапиро В. Г., Гуртовой К. Г. и др.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1972. Т. 62, вып. 6. С. 2221—2232.
76. Уайт Р.//Успехи физ. наук. 1971. Т. 103, вып. 4. С. 593-607.
77. Wada N., Lbukoshi K., Hirakawa K.//J. Phys. Soc. Japan. 1982. Vol. 51. N" 9. P. 2833—2839.
78. Renaudin **J.,** Pannetier **J.,** Peland S.//Solid State Commun. 1983. Vol. 47, № 6. P. 445—447.
79. McAlister S. R., Strobel P.//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 30. P. 340—348.
80. Белов Н. В., Головастиков Н. И., Иващеико А. Н. и др.//Кристаллография. 1982. Т. 27, вып. 3. С. 511-515.
81. Sugano T., Kinoshita M., Shirotani L//Solid State Commun. 1983. Vol. 45, № 2. P. 99—102.
82. Jaccarino V.//Phys. Rev. 1959. Vol. 2, № 4. P. 163—168.
83. Гуртовой К. Г., Лагутин А. С., Ожогин В. И.// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1982. Т. 83, вып. 5. С. 1941—1954.
84. Бажаи А. Н.//Там же. 1974. Т. 67, вып. 4(10). С. 1520—1526.
85. Котюжанский Б. Я., Прозорова Л. А., Свистов Л. Е.//Там же. 1985. Т. 88, вып. 1. С. 221—228.
86. Brown P. J., Welford P. **J.,** Forsyth **J.** B.//J. Phys. e.: Solid State Phys. 1973. Vol. 6. P 1405—1413.
87. Tsuda T., Yasuoka H.//J. Phys. Soc. Japan. 1978. Vol. 45, N" 1. P. 115- 121.
88. Breed D. L, Gilianse K., Miedema A. R.//Physica. 1969. Vol. 45, N» 2. P. 205—211.
89. Bartolome P., Navarro R., Gonzalez D.//Ibid. 1977. Vol. 92B, № 1. P. 45—51.
90. Carlin R. L., van der Bilt A., Jong K. 0.//Ibid. 1981. Vol. I11BC, № 2—3. P. 147—154.
91. Burgiel J. S., Jaccarino V., Schawlow A. L.//Phys. Rev. 1961. Vol. 122, N» 2. P. 429—436
92. Bastow T. J., Whitfield H. J., Bristow G. KM Phys. Lett. 1981. Vol. 84**A,** N» 5. P. 2
93. Adachi A., Achiva N., Mekata **M.**//J. Phys. Soc. Japan. 1980. Vol. 49, № 2. P. 545—552.
94. Saez Puche R., Norton M., White T. R. e. a.//J. Solid State Chem. 1983. Vol. 50. P. 281—293.
95. Phaff A. C., Swuste C. H. W., de Jonge W. J. H.

e. a.//J. Phys. C: Solid State Phys. 1984. Vol. 17. № 14. P. 2583-2594.

96. Васюков В. Н., Журавлев А. В., Лукин С. Н. и др.//Физ. твердого тела. 1984. Т. 26, вып. 5. С. 1297—1305.

97. Barbara B., Boucherle **J.** X., Buevoz **J.** L. e. a.// Solid State Commun. 1977. Vol. 24, P. 481—484.

98. Aarts J., de Boer F. R., Horn S. e. a.//Physika. 1981. Vol. 107 B. P. 381—382.

99. Hanzawa K-, Kasuya T.//J. Phys, Soc. Japan. 1984. Vol. 53. P. 1809—1818.

100. Yakinthous J. K., Routsi Ch., Penelope Schobinger-Paramantellous//J. Phys. Chem. Solids. 1984. Vol. 45, № 6. P. 689—693.

101. Ellingsen O. S., Bratsberg H., Mroczkowsky S.// J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, N 11, pt 2. P 7948—7950.

102. Hamaker H. C., Woolf L. D., Mac Kay H. B. e. a.//Solid State Commun. 1979. Vol. 31, № 3. P. 139-144.

103. Hamaker H. C., Woolf L. D., Mac Kay H. B. e. a.//Ibid. 1979. Vol 32, N" 4. 289—294.

104. Lee K., Muir H.//J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 1043-1045.

105. Gaur K., Tripathi A. K., Lai H. B.//J. Materials Sci. Lett. 1983. Vol 2. P. 161—162.

106. Ishikawa M., Muller **J**.//Solid State Commun. 1978. Vol. 27, № 8. P. 761—763.

107. Буздин А. И., Булаевский А. Н., Кулич М. Л. и др./А^спехи физ. наук. 1984. Т. 144, вып. 4. С. 597—

108. Тейлор К., Дарби М. Физика редкоземельных •элементов: Пер. с англ. М.: Мир, 1974.

109. Thomlinson W., Shirane G., Moncton D. E. e. a.// J, Appl. Phys. 1970. Vol. 50, N" 3, pt 2. P. 1981—1982.

110. **All N.. Woods S. B**.//J. Low Temp. Phys. 1984. Vol. 56, N 56. P. 575—584.

111. Schienle M., Kasten A., Лыller P. H.//Phys. status solidi (b). 1983. Vol 119, N 2. P. 611—620.

112. Moncton D. E., Shirane G., Thomlinson W. e. a.// Phys. Rev. Lett. 1978. Vol. 41, № 16. P. 1133—1136.

113. Raaen A. M., Svare J., Pedersen V.//Physica. 1983. Vol. 121 B. P. 89—94.

114. Trezebiatowski W.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P Wohlfarth. Amsterdam — New York — Oxford; North-Holland Publ. Cотр., 1980. P. 415—449.

115. Изюмов Ю. А.//Успехи физ. наук. 1980 Т. 131, вып. 3. С. 387—422.

116. Lottermoser W., Miiller R., Fuess M.//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1986. Vol. 54—57, pt. 2. P. 1005—1006.-

117. Боровик-Романов А. С., Котюжанский Б. Я., Прозорова Л. А.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1970. Т. 58, вып. 6(6). С. 1911—1918.

118. Александров К. С., Аиистратов А. Т., Мельникова С. В. и др.//Физика твердого тела. 1979. Т. 21, №4. С. 1119—1124.

119. Buyers W. J. L., Morrs R. M., Armstrong R. L. с. a.//Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 56, N» 4. P. 371—373.

120. Cox D. E., Shapiro S. M., Cowley R. A. e. a.// Phys. Rev. B. 1979. Vol. 19, N» 1. P. 5754—5772.

121. Валянская Т. В., Плахтий В. П., Соколов В. И.// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1976. Т. 70, вып. 6. С. 2279—2285.

122. Прозорова Л. А., Марченко В. И., КраслЯК Ю. В.//Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41, вып. 12. С. 522—524.

Глава 29

ФЕРРИТЫ И ДРУГИЕ МАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

М. в. Быстрое, В. Л. Ивашинцева, С. А. Миронов. Р. В. Писарев

29.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Магнитные свойства. Среди магнитоупорядоченных материалов в особую группу выделяют ферримагнетики, или, иначе, ферриты. В отличие от простых ферромагнетиков, или антиферромагнетиков, характерной особенностью которых является расположение магнитных атомов в трансляционно-эквивалентных узлах, к ферримагнетикам относят материалы, в которых имеются неэквивалентные в кристаллографическом и (или) в магнитном отношении подрешетки. При таком определении ферримагнетизма ферромагнетик представляет собой частный случай ферримагнетика с одной магнитной подрешеткой, а простой антиферромагнетик — частный случай ферримагнетика с двумя эквивалентными подрешетками. Наличие неэквивалентных подрешеток определяет богатство магнитных свойств ферримагнетиков, отличающихся от свойств ферро- и антиферромагнетиков, хотя при определенных условиях можно найти общие черты среди этих различных групп магнетиков.

Магнитные свойства ферримагнетиков были впервые объяснены Неелем **f1|** на основе двухподрешеточной модели, предложенной им для ферритов со структурой шпинели (см. ниже), в которой магнитные ионы занимают тетраэдрические позиции (узлы ***А)*** и октаэдрические позиции (узлы ***В)*** Основным взаимодействием является антиферромагнитное (отрицательное) взаимодействие между ионами из различных подрешеток, что вызывает антипараллельное расположение их магнитных моментов. При этом результирующую намагниченность (на 1 м^ вещества) можно представить в виде разности намагниченностей подрешеток:

$$M_{AT}, \qquad H)\text{-}Mj^{(T,H)}. \tag{29.1}$$

Поведение величины Ms в зависимости от температурь: и поля может носить более сложный характер, чем в ферромагнетиках, так как характер изменения Мл и Мв с температурой и с полем может быть различным. Так, при повышении температуры может быть монотонное уменьшение Ms и обращение Ms в нуль в точке Кюри Гс. выше которой вещество парамагнитно, хотя парамагнитная восприимчивость изменяется с температурой по закону, отличающемуся от закона Кюри для простых парамагнетиков При повышении температуры в области ниже Тс возможно также увеличение спонтанной намагниченности в определенном температурном интервале. Для некоторых ферритов, в частности для многих редкоземельных ферритов — гранатов (см. табл. 29.15 и рис. 29.22), существует температура компенсации Ткомп, при которой намагниченности подрешеток становятся одинаковыми и результирующая намагниченность обращается в нуль. Появление точки компенсации возможно также при изменении состава ферримагнетика, например в иттрий-железо-галлиевых гранатах.

При описании магнитных свойств ферритов пользуются также удельной намагниченностью насыщения

Cs=Ms/d, где ***d*** — плотность. Предел as при температуре, стремящейся к нулю, обозначают Связь между а® и числом магнетонов Бора ив на одну формульную единицу феррита дается выражением

(29.2)

где [Iв — магнетон Бора; М — молекулярная масса, соответствующая одной формульной единице; ***Na*** — число Авогадро. Магнитный момент на молекулу р^ при Г=0 определяется как

(29.3)

где ***Па***, ***пб*** — число магнетонов Бора, приходящихся на атомы в позициях ***А и В*** соответственно.

Энергию магнитного взаимодействия, зависящую от ориентации намагниченности относительно кристаллографических осей, называют энергией магнитной кристаллографической анизотропии. Для кубического кристалла (к ним относятся ферриты со структурой шпинели и граната) эту энергию обычно записывают в виде [2]

Еа= К г {4 + 4 4 + 4 4) + ^24 4 4 + - '

где /<1, Кг — константы анизотропии, а Иь а^, «з — направляющие косинусы вектора намагниченности относительно осей, совпадающих с ребрами куба. Магнитную анизотропию можно характеризовать с помощью эффективного внутреннего поля напряженностью На=2КjMs.

Под действием магнитострикции при изменении намагниченности в кристалле происходит деформация кристаллической решетки В частном случае феррита кубической структуры относительная магнитострикиионная деформация может быть представлена в виде

/ - - 2 +

+ 3X,,, (aj a, p, P, + ад Рз + **«1 «3** Pi Рз), (29.5)

где Xkio и Хщ — константы магнитострикции насыщения в направлениях [100J и [П1] соответственно, а Рь Рг, Рз — направляюшие косинусы оси, вдоль которой измеряется деформация.

Феррит, помещенный в постоянное магнитное поле напряженностью ho и перпендикулярное к нему переменное СВЧ-магнитное поле, поглощает СВЧ-энергию. Это поглощение носит резонансный характер (ферромагнитный резонанс) и максимально на частоте Ио, определенным образом связанной с полем Но. Зависимость резонансной частоты (Оо от Но имеет сложный характер и определяется магнитной кристаллографической анизотропией, анизотропией формы, упруго напряженным состоянием образца и т. п. [3]. В наиболее простом случае изотропной сферы

«0 = 7^^0. (29.6)

Здесь Y — гиромагнитное отношение:

Э.7)

2mc

где *е* — заряд электрона; *m* — масса покоя электрона; *с* — скорость света; *g* — фактор спектроскопического расщепления. Для ферритов со структурой шпинели гри наличии двух подрешеток значение ^-фактора дается выражением [4]

S = , (29 8)

где и ^в — факторы спектроскопического расщепления для ионов в Л- и В-узлах соответственно.

Амплитуда и форма резонансной кривой поглощения определяются процессами релаксации. Наличие их приводит к тому, что компоненты тензора магнитной проницаемости становятся комплексными величинами. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитная проницаемость скалярна. Ширина резонансной кривой ферромагнитного резонанса ДЯ обычно определяется как разность полей, при которых мнимая часть диагональной компоненты тензора проницаемости р," составляет половину своего значения [1"рез в точке резонанса. Зависимость ее вещественной \i' и мнимой ц" частей от частоты называют магнитными спектрами. Для магнитных спектров ферритов характерно наличие двух областей дисперсии. Низкочастотная область дисперсии обусловлена смещением границ доменов, а более высокочастотная — «естествепг.ым» ферромагнитным резонансом в эффективных полях анизотропии и размагничивающих полях.

Упругие свойства и магнитоупругое взаимодействие. Магнитоакустические эффекты в ферритах возникают в результате взаимодействия спинов магнитных ионов и упругих колебаний кристаллической решетки, т. е. в результате тех же взаимодействий, которые определяют магнитострикционные эффекты. Выражение для упругой и магнитоупругой энергий можно записать в виде

+ m (+ 4) + Ci2 (exx eyy + eyy +

+ ezzexx) + Bz {4'xx +'^leyy+aleyy) +

-f B^ (a^ ay e^y + ay a, ву, + a, a^ e,^), (29.9)

где Cii=Criii, C12=^1Г22. C44=C232i — коэффициенты упругой жесткости, Bi = biiii, B^=b232s. — магнитоупругие коэффициенты.

Условия для упругой и магнитоупругой изотропии следующие:

Си - Ci2 = 2C44; Ву = Б^. (29.10)

Первое условие выполняется, например, в иттриевом феррите-гранате с погрешностью до 5%. Значения коэффициентов, определяющих упругие и магнитоупругие свойства, см. в табл 29.18, 29.21, 29.22.

Оптические и магнитооптические свойства. Ферриты обладают сравнительно высокой прозрачностью в ряде участков ближнего и далекого инфракрасного спектров. Ферриты-гранаты характеризуются лучшей прозрачностью, чем ферриты-шпинели. Так, в иттриевом феррите-гранате имеются окна прозрачности при длинах волн 1<X<0,1мм и1<Л<10 **МКМ**; между двумя этими областями наблюдается сильное решеточное поглощение. В редкоземельных ферритах-гранатах в первой области прозрачности могут наблюдаться поглощение при ферромагнитном резонансе (если поле анизотропии велико) в случае обменного резонанса редкоземельной подрешетки в поле железных подрешеток, а также электронные переходы между уровнями основного мультиплета редкоземельных ионов. Во второй области наблюдаются электронные переходы в редкоземельных ионах и (при более коротких длинах волн) электронные переходы в ионах железа в октаэдрических и тетраэдрических позициях. Ферриты-гранаты в видимой и ближней инфракрасных областях спектра обнаруживают значительный эффект Фарадея при распространении света вдоль вектора намагниченности и примерно такой же по модулю эффект Коттона — Мутона (магнитное линейное двупреломление) при распространении света перпендикулярно вектору намагниченности [109—ПО].

Ниже рассмотрены характерные особенности структуры и магнитных свойств различных групп ферритов, наиболее интересных в научном и техническом аспектах, а именно ферритов со структурой шпинели, граната, гексаферритов. Кроме того, приведены некоторые сведения о свойствах халькогенидных шпинелей, обладающих ферромагнитными и антиферромагнитными свойствами, а также сведения о ферромагнитных и антиферромагнитных халькогенидах европия и других ферромагнетиков с различной структурой. Свойства большого и важного класса ортоферритов рассмотрены в главе об антиферромагнетиках.

29.2. ФЕРРИТЫ-ШПИНЕЛИ

Ферриты-шпинели имеют кристаллическую структуру типа минерала шпинели MgAbOi и химическую формулу Me^Fef^O,, где Me^+ — ион двухвалентного металла, а ионы железа Fe^+ — трехвалентны. В случае простых ферритов Me представляет собой один из двухвалентных ионов переходных элементов, например Mn, Ni, Co или Mg; возможна также комбинация этих ионов (твердые растворы ферритов или смешанные ферриты). Трехвалентные ионы железа в MePe204 могут быть полностью или частично замещены другими трехвалентными ионами, например AIH или Cr3+ (смешанные ферриты-алюминаты или ферриты-хромиты).

В структуре типа шпинели ионы кислорода образуют гранецентрированную кубическую решетку с ребром ***а.*** В промежутках между ионами кислорода находятся ионы металлов, причем эти ионы окружены четырьмя или шестью ионами кислорода. Такие окружения называют соответственно тетраэдрическими (или Л) и октаэдрическими (или ***В)*** позициями. Шпинели, в которых ионы Me^+ находятся в тетраэдрических позициях, а ионы Fe^+ — в октаэдрических, называют нормальными. Если ионы Me8+ и половина ионов Fe"+ находятся в октаэдрических позициях, то шпинель называют обращенной. При смешанном распределении двухвалентные ионы металла находятся как в ***А-,*** так и в В-позициях.

Принято ионы, занимающие тетраэдрические позиции, записывать в формуле феррита перед квадратными скобками, а ионы, занимающие октаэдрические позиции, — в скобках. Тогда, например, формула цинкового феррита, имеющего структуру нормальной шпинели, запишется в виде Zn2+[Fe|^]04, никелевого феррита со обращенной шпинели — в виде **F**?+[№+**f"**+]04, а" распределение ионов смешанной марганцевой шпинели — формулой

Свойства ферритов-шпинелей отражены в табл. 29.1—29.9 и на рис. 29.1—29.19.

А. Простые ферриты

Таблица 29.1. **Значения основных параметров простых ферритов со структурой шпинели**

ПК — поликристаллический; мк — монокристаллический; тетр — тетрагональный; куб — кубический

		MgFe,0.	MnFe^O,	CuFe^O.
Постоянная решетки а, нм	**15]**	0.836 [50]	0,8517 [23]	0,837 (куб.)*2 [34] c = 0,870 1 , ,
Распределение катионов	Fe[Fe^-^ Pe] [6]	Mg„„iFeo,9, [Mgo.gF^MI [50,51]	1MIIo,2pe,.8] [23]	Fe[CuFe] [36]
Кислородный параметр и	0,379 [6]	0,381 [50]		0,380 [12]
Рентгеновская плотность d^ , 103 кг/мз	5,24 [6]	4,52 [50]		5,35 [12]
Температура Кюри T^ , K	858 [5]	713 [51	573 [51	728 [5]
Магнитный момент на молекулу	4,1 (O K) [6]	1,1 (25 K) [52]	4,6 (O K) [23]	2,3 (куб) (O K) [37] 1,3 (тетр) (O K) [37]
Удельная намагниченность насыщения ay, A • м^/кг	98 (O K) [5] 92 (300 K) [51	31 (O K) [58] 27 (300 K) [51	**80^(300"к)^[5|**	30 (O K) 25 (300 K)
Намагниченность насыщения Mg, кА/м	510 (O K) [51 477 (300 K) [5]	143 (O K) [51 119 (300 K) [5]	557 (O K) 398 (300 K)	158 (O K) [51 135 (300 K) [5]
Первая константа анизотропии Kj, 103 Дж/мз	-10,7 [71	-3,5 [53] -2,5 [54]	-18,7 (77 K) Г94, -2,8 (300 K)	-20,6 (77 K) [38] -6,3 (300 K) [38]
Вторая константа анизотропии Кг, 103 Дж/мз	-2,8 [71		-0,3 77 K) fodi —0,2 300 K) ^^^^	
Константа магнитострикции >., 10-6	77,6 [111] -19,5 [100], 57,1 [ПО, (	2,0[111]-6(>„)[171 -10,6 [100, 59]	-35 [ПОО] [K]"^^ ^^	-15 [39]
Фактор спектроскопического расщепления g	2,03 (123 K) [9] 2,12 (294 K) [9]	2,03-2,06 (ПК) [55]	2,019 (77 K) [24] 2,004 (300 K) 24]	2,20 (77 K) [39] 2,04 (300 K) [39]
Ширина линии ферромагнитного резонанса Дй, кА/м	70 (пк) [8]	1,59 [53] 36 (пк) [54]	0,95 (423 K) 25] 1,03 (294 K) 26] 250 [51	27,8 (пк)[41] 70 [40]
Огиосительная начальная магнитная проницаемость ^i-fj				
Диэлектрическая проницаемость £= *E' — ie"*		£'=9,66 (4,55 ГГц) r" = 0,17 [42]		e'=9,24(4,55 ГГц)
Удельное сопротивление Ро, 10^ Ом • м	5.10-9 [10, 43]	(Г=373 K) [44]	2-10-3 [27] (Mni.ieFei.sA)	(373 K) [44]

Параметр*'			
Посгоянная решетки а, нм	0,838 [17]	0,8337 [11, 13]	0,833 [28]
Распределение катионов	Fe[CoFe] [45^	Fe[NiFe] [12]	Fe[Lio,5Fe,,5] [s
Кислородный параметр *и*	0,381 [45]	0,381 [60]	0,382 [28]
Рентгеновская плотность d^, 103 кг/мз	5,29 [45]	5,37 [13]	4,75 [28]
Температура Кюри Т^^ , К	793 [5]	858 [13]	943 [5]
Магнитный момент на молекулу Рт.	3,94 (О К) [46]	2,3 (О К) [5]	2,6 (О К) [5]
Удельная намагниченность насыщения с^, А • ы^/кг	94 (О К) [58] 80 (300 К) [5]	56 (О К) [58] 50 (300 К) [5]	69 (О К) [58] 65 (300 К) [5]
Намагниченность насыщения М^, кА/м	477 (О К) [5] 422 (300 К) [5]	302 (О К) [5] 255 (300 К) [61J	334 (О К) [5] 285 (300 К) [61
Первая константа анизотропии Кц 103 Дж/мз	4,4 - 102 (77 К) [15] 2,9 • 102 (300 К) [15]	- 8,7 (77 К) [14] —6,2 (300 К) - 3 [16]	- 12,7 (77 К) [Й] —8,4 (300 К) [29] - 9,7 (77 К) [2 —0,2 (300 К) '
Вторая константа анизотропии К2, 103 дж/м-ч			
Константа магнитострикции Х, 10"®	120 [111] (Coo,8Fe2_20i) [15] -590[100]-110(X^) [17]	- 4 [111] - 26 (X^) [17] - 36 [100, 14]	2,7 [111] - 8(X,) [31] - 28,7 [100, 2]
Фактор спектроскопического расщепления *g*	2,7 (363 К) (мк) [48] 2,22 (373 К) (ПК) [49]	2,198 (85 К) 2,196 (298 К) [18] 0,75 [19] 1,19 [20]	2,012 (77 К) fon, 2,003 (300 К) 0,06 (134 К)
Ширина линии ферромагнитного резонанса ДЯ, кА/м			
Относительная начальная магнитная проницаемость (хд	25 (ПК) [5]	80 (мк) [14] 39 (ПК) [21]	33 (ПК) [5]
Диэлектрическая проницаемость е = е' — *и"*	е' = 10 (4,55 ГГц, ПК) [42]	19 (мк) 21 (ПК) I'^J	
Удельное сопротивление ро, 10^ Ом • м	0,5 (373 К) [44]	**2 [22]**	~ 1 • 10-« [33]

•1 Значения физических величин приведены, если не оговорено специально, для монокристаллов при температуре 293 К.

Структура медного феррита CuFe^O^ зависит от термообработки. При медленном охлаждении ниже температуры трансформации Г^р происходит переход кубической структуры в тетрагональную. Г^р = 1033 К [36], 688 К [56] и 663 К [57]. В результате закаливаиия при Г > Т^jj кубическая структура сохраняется при температуре 293 К.

Б. Смешанные ферриты

Таблица 29.2. **Результаты экспериментов по дифракции нейтронов в ряде образцов ферритов Mg.,Mni_;,Fe204 [11]**

Гзак — температура закалки; а — постоянная решетки; *и* — кислородный параметр

X	^зак- К	с, им	*и*	Доля ионов в тетраэдрических узлах	
				Mg^+	Mii2+
0,25	1673	0,8485	0,3850	0,12	0,89
0,25	1273	0,8479	0,3848	0,09	0^78
0,5	1673	0,8455	0,3839	0,18	0,92
0,5	1273	0,8450	0,3836	0,14	0,82
0,75	1673	0,8424	0,3834	0,24	0,90
0,75	1273	0,8421	0,3831	0,21	0,98
0,9	1673	0,8406	0,3831	0,25	1,00
0,9	1273	0.8403	0,3821	0,21	0,90

Таблица 29.3. **Зависимость некоторых параметров кобальтцинковых ферритов CojrZni_jFe204 от содержания кобальта jc [62, 63]**

Tq — температура Кюри; о^ — удельная намагниченность насыщения

	Tc. К	C	fj,, A-mVkp, при температуре *T*, К			
			285	*77*	20	0
0,2	298	4,06	18,5	62,0	72,6	95,0
0,3	355	4,90	39,3	91,0	95,5	114,0
0,4	410	5,78	61,0	119,2	126,0	132,0
0,6	548	6,03	87,5	128,5	133,2	143,0
0,8	662	4,87	93,7	110,0	110,0	115,5
0,9	733	4,29	90,0	93,9	94,1	102,0
1,0	788	3,67	83,6	83,0	82,6	87,5

Таблица 29.4. Зависимость намагниченности насыщения Ms и фактора спектроскопического расщепления g для поликристаллического феррита COq yZnoaFesOi от температуры

Приведены также значения g-фактора и первой константы анизотропии Ki для монокристалла того же состава. Температура Кюри Т^ =613 К. Измерения в интервале температур от 223 до 283 К проводились на частоте 23,6 **ГГц,** а в интервале от 293 до 553 К — на частоте 9,25 **ГГц** [64, 65]

т, к	Поликристалл		Монокристалл	
	кА/м		g	j *Ki,* 10" Дж/м»
	]	^		
223	560		1,90	12,03
248	545		1,90	8,41
283	500		1,91	4,51
293	506	2,07	1,91	2,36
313	450	2,10	1,92	1,34
333	381	2,11	1,96	0,16
353	338	2,12	2,06	-0,21
393	269	2,15	2,12	—0,41
433	203	2,16	2,12	-0,34
473	134	2,17	2,17	—0,21
513	61	2,18	2,16	—0,07
553	8	2,19	2,15	—0,01

Таблица 29.5. **Зависимость некоторых параметров никелевых ферритов — алюминатов NiFe2-jcAljc04 от содержания алюминия *x* [66, 67]**

а — постоянная решетки; Г^ — температура Кюри; — магнитный момент на молекулу; ***g*** — фактор спектроскопического расщепления

		Tc. К			g
			медленное охлаждение	закалка при 1623 К	
0,00	**0,8337**	**580**	**2,29**	**2,29**	**2,3**
0,25	**0,83062**	**506**	**1,30**	**1,59**	**2,7**
0,45	**0,82769**	**465**	**0,61**	**1,19**	
0,50	**0,82705**	**430**	**0,44**	**0,99**	бГэ
0,625	**0,82521**	**360**	**0—0,045**		**3,8**
0,75	**0,82329**	**294**	**0,38**	**0,58**	**1,5**
1.00	**0,81951**	**198**	**0,64**	**0,42**	

Таблица 29.6. **Значения фактора спектроскопического расщепления *g* и магнитного момента на молекулу pj^ для феррита ЫРевОв и его твердых растворов с CdFe204 и LiAlBOg [68]**

Состав	g (Г = 300 К)	
LiFeA	1,96	2,38
(LiFe50e)o,75(CdFe204)o.25	1,97	3,44
(LiFe60g)o^65(CdFe,04)o,35	1,96	4,10

Продолжение табл. 29.6

Состав	g (г = 300 К)	С ^В
(LiFe50,)o.5o(CdFe,04)o,5o	1,97	4,70
(LiFe,08)o.25(CdFe,04)o.75	1,99	4,53
Li(Feo^9Alo.,)B08	1,97	1,99
Li(Feo,«Alo.2)BO«	1,99	0,62
Li(Feo.7Alo.3)B08	2,01	0,10
Li(Feo,6Alo,4)B08	—	0,13

Таблица 29.7. **Зависимость параметров литий-хромовых ферритов от содержания хрома**

Содержание хрома *X*	Распределение ионов металлов		*Tc.K*	^комп-	
0,0	Fei,oo[Lio.5oFei.5o]04	0,8331	953	—	2,47—2,60
0,50	Fei,oo[Lio,5oFei,ooCro,5ol04	0,8306	*773*	—	1,50-1,62
0,75	Fe0.98Li0.02tLi0.48Fe0.77Cr0.75lO4	0,8296	683	—	1,35
1,00	Feo.96Lio.o4tLio.44Feo.56Cri.oo]04	0,8292	588	478	0,84
1,25	Feo,9iLio,o9lLio,4iFeo.34Cri,25]04	0,8290	487	311	0,61
1,50	Feo.8oLio.2o[Lio.3oFeo.2oCri.5o]04	0,8287	392	257	0,55
1,60	Feo.64Lio,36rLio,i4Feo,26Cr,,6o]04	0,8288	440	284	0,42
1,70	Feo.54Lio.46tLio,i4Feo,26Cri,7o]04	0,8290	428	293	0,22
2,00	Feo.5oLio.5o[C'-2.ool04	0,8288	353d=16	310d=15	

Таблица 29.8. **Основные характеристики хромовых халькогенидных шпинелей**

Соединение	Параметр решетки, 10-ᵒ им	Тип магнитного упорядочения	Температура Кюри или Нееля, К	Магнитный момент (ᵒB / ᵒол.	Край поглощения, мкм		Тип проводимости и удельное сопротивление о, Ом • м, при 300 К	Литература
					ЗОО К	4,2 К		
CclCr.2Se4	10,755	Ферромагнитное	130	5,98	0,94	1,08	Полупроводник р-типа, 102—103	[76,77, 78-811
CdCr2S4	10,244	»	85	5,9	0,79	0,69	То же и-типа, 10^—10"	[78, 79 g2—84]
HgCr2Se4	10,753		106	5,6	1,48	3,88	Тоже р-типа, 0,7-10-2	№—881
HgCr,S4	10,237	Антиферромагнитное	36	5,5	.	1,27	То же	[89 , 90]
ZnCr^Sea	10,443	»	20	.	0,97	1,10	То же р-типа	[91, 92]

Таблица 29.9. Магнитооптические параметры некоторых хромовых халькогенидных шпинелей

Соединение	Фарадеевское вращение, град/см	Магнитооптическая добротность, град/дБ	Литература
CdCr,S4	8,0 • 103 (к = 0,8 мкм)	30 (X = 1 мкм)	**[93]**
	Т = 80К, Я = 480 кА/м		
CdCr2Se4	9,2 • 10S (к = 1,17 мкм)	63(х=1,3мкм)	**[94]**
	Г = 82 К, Н = тОкА1м		

Продолжение табл. 29.9

Соединение	Фарадеевское вращение, град/см	Магнитооптическая добротность, град/дБ	Литература
HgCr,Se4	10» 1l 4,5		[95]
	Г = 85 К, Я = 360 кА/м, л = 10,6 мкм		
CoCr,S4	1,3-10« (Х=1мкм, Г=80 К) (вычислено из эффекта Керра)		[961

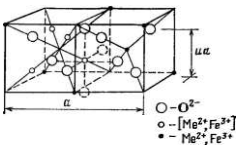


Рис. 29.1. Два октанта шпинельной структуры. Большими светлыми кружками обозначены ионы кислорода, малыми светлыми и черными кружками — ионы металла в октаэдрических и тетраэдрических позициях соответственно [5]

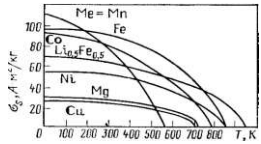


Рис. 29.2. Зависимость удельной намагниченности насыщения Cij для некоторых простых ферритов-шпинелей от температуры [5]

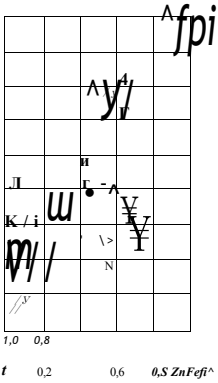


Рис. 29.3. Магнитные моменты насыщения р^ при О К некоторых смешанных ферритов, полученных замещением магнитных ионов двухвалентного металла Ме^+ немагнитными ионами цинка — один из ионов Мп, Fe, Co, Ni, Си, Mg или Lio.s Рео.в) [37]

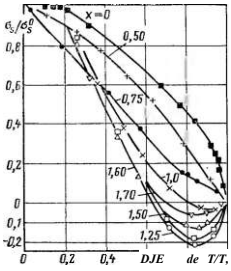


Рис. 29.4 Зависимость относительной намагниченности насыщенных os1a^or приведенной температуры T/Tc для литиевых ферритов-хромитов Lio.s Fe2,5_* CT^cOi [70]

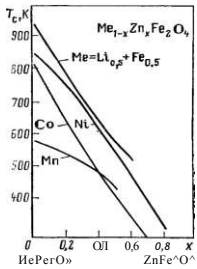


Рис. 29.5. Зависимость точки Кюри *Tc* некоторых смешанных ферритов типа Mei_x 2nx Pe204 от концентрации цинка [5]

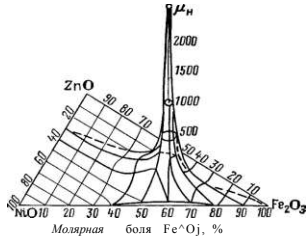


Рис. 29.6. Зависимость начальной магнитной проницаемости ^iH ферритов в системе Ni—ZnO—FeaOs от их состава [71]

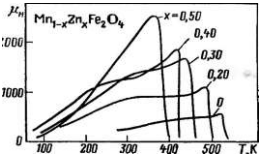


Рис. 29.7. Зависимость начальной магнитной проницаемости iiH смешанных марганец-цинковых ферритов от температуры [5]

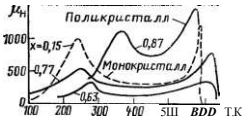


Рис. 29.8. Зависимость начальной магнитной проницаемости ЦдОт температуры для ферритов Мп,_х Ре ^Ре204 [72]

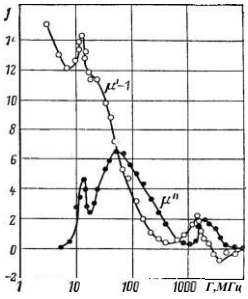


Рис. 29.9. Зависимость вещественной и мнимой [.i" частей начальной магнитной проницаемости от частоты для поликристаллического феррита (Mg0)o,8.(pe0)o,.9pe203 при температуре 293 d=3,68-103 кг/м8; (J4299 K) =26,4 А-м^/кг

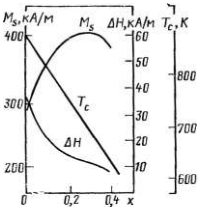


Рис. 29.10. Зависимость намагниченности насыщения ***Ms,*** ширины линии ФМР ДЯ (10 ГГц) при температур 293 К и температуры Кюри Гслитиевых ферритов состава $Li_{0,5-x/2}Z$ от *x* [61]

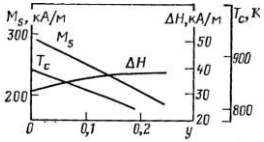


Рис. 29.11. Зависимость намагниченности насыщения, ширины линии ФМР Д/У (10 ГГц) при температуре 293 К и температуры Кюри ***Тс*** литиевого феррита состава Lio,5+B/2 Fe2,5-3!,/2 Ti^Oi (с добавками ионов Мп и Bi) ***от y*** [61]

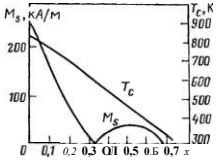


Рис. 29.12. Зависимость намагниченности насыщения при комнатной температуре и температуры Кюри никелевого феррита состава NiFe2_2^Al2x04 от * (Образцы были тщательно отожжены [61].)

Рис. 29.15. Температурная зависимость ширины резонансной кривой сферы на CdCrjSei [76]:

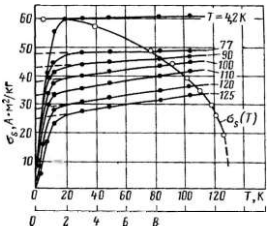


Рис. 29.13. Зависимости спонтанной удельной намагниченности от внешнего магнитного поля при оазличной температуре и от температуры Os (Г) в CdCr2Se4 [76]

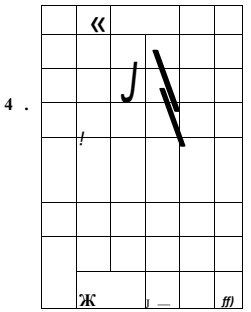


Рис. 29.14. Угловые зависимости резонансного поля *(а)* и ширины резонансной кривой (б) сферы из CdCr2Se4 [76]: 7=4,2 К; в — угол между линиями постоянного магнитного поля и осью [100]; *1* — кристалл, выращенный методом кристаллизации из квазиоднородного расплава; *2* — кристалл, выращенный методом переноса в жидкой фазе; *3* — кристалл, выращенный методом кристаллизации из квазиоднородного расплава, с молярной примесью Ag 0,08%

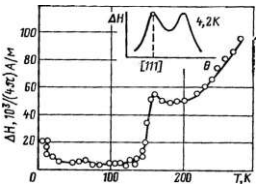


Рис. 29.18. Зависимость удельного сопротивления монокристаллов Iinx CrzSe^ и-типа от температуры [80] при различных значениях *x* _»

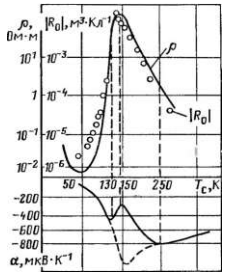


Рис. 29.16. Температурная зависимость удельного электросопротивления р, нормального коэффициента Холла и коэффициента гермо-ЭДС а для образца CdCr2Se4 (примесь — iVo In) [77]:
·зависимость, полученная экспериментально; расчет по однозонной модели

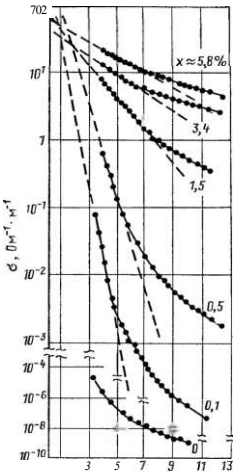


Рис. 29.17. Зависимость удельной проводимости монокристаллов Cdi-xAg;^ Cr25e4 р-типа от температуры при различных значениях *x* i78j. Данные по электропроводности чистого кристалла (кривая л:=0) взяты из

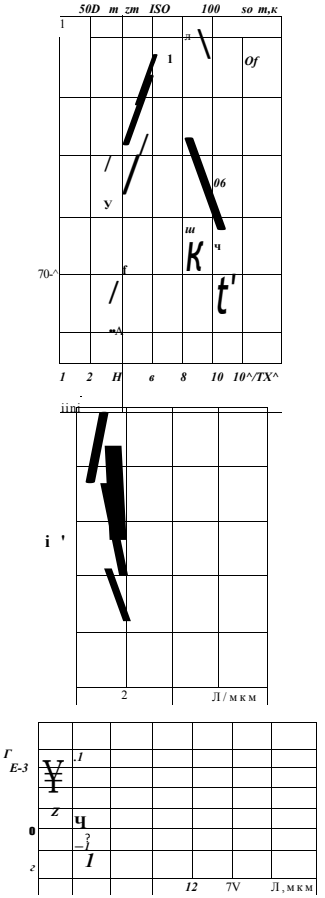


Рис. 29.19 Спектральная зависимость фарадеевского вращения в CdCrsSe, при 7"=82 К, ^=1,2-1 из кА/м [61] (точки — экспериментальные значения, линии — расчетные зависимости):
1 — соответствующая резонансной длине волны; *2* — квадратичному закону; *3* — постоянный вклад от ФМР

29.3. ФЕРРИТЫ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА

Кристаллографическая структура. Ферримагнитные оксиды типа граната кристаллизуются в структуре, изоморфной классическому минералу гранату {Cas}[Al2](Si3)Oi2. Структура граната описывается кубической пространственной группой Ia3d — O'^. Элемент структуры показан на рис. 29.20. Кубическая элементарная ячейка граната содержит восемь формульных единиц. Шестнадцать ионов AF+ занимают октаэдрические позиции, обозначаемые 16a, двадцать четыре иона .-занимают позиции в центрах тетраэдров, обозначаемые 24d, и двадцать четыре иона Ca^+ находятся в окружении из восьми ионов кислорода, и их позиции обозначаются 24c.

Интерес к структуре граната значительно возрос после синтеза ферримагнитных гранатов типа MsPe5012, где M — ион редкоземельного металла или иттрия.

Магнитные свойства и на.магниченность насыщения. В гранатах в отличие от ферритов со структурой шпинеля были введены в рассмотрение три магнитные подрешетки. Наиболее сильное антиферромагнитное взаимодействие, определяющее температуру Кюри ***Tc,*** осуществляется между ионами трехвалентного железа в октаэдрической 16a- и тетраэдрической 24c1-подрешетках. Подрешетка редкоземельных ионов 24c наиболее сильно связана отрицате-льным обменным взаимодействием с тетраэдрической подрешеткой (в гранатах с легкими редкоземельными ионами от Pr до Sm — октаэдрической подрешеткой), причем эта связь примерно в 10 раз с.чабее, чем (a — ***d)-*** взаимодействие Намагниченность насыщения Ms в случае тяжелых редкоземельных гранатов может быть записана через намагниченности отдельных подрешеток следующим образом:

(29.11)

Ферромагнитный резонанс и анизотропия. Ферриты-гранаты имеют меньшую удельную намагниченность, чем ферриты-шпинели, и большой интерес к ним был вызван в основном их уникальными свойствами в СВЧ-диапазоне. Минимальные значения ширины линии ферромагнитного резонанса Д Я^ 16 А/м (0,2 Э) были получены в иттриевом феррите-гранате, свободном от примесей редкоземельных ионов.

Для теоретической интерпретации результатов по ферромагнитному резонансу и анизотропии редкоземельных ферритов-гранатов необходим одновременный учет расщепления уровней ионов под действием кристаллического поля, спин-орбитального и обменного взаимодействий, которые подчас являются величинами одного порядка. В настоящее время информация об электронных уровнях ионов редкоземельных элементов еще недостаточна для надежной теоретической интерпретации результатов.

Магнитострикция. Магнитострикция редкоземельных ферритов-гранатов линейно связана с концентрацией редкоземельных ионов и сильно возрастает при понижении температуры. Рекордные значения Xii,=2420-10-® и Я,оо= 1200-10-е в поле напряженностью H= 2000 кА/м при температуре 4,2 К были получены в тербиевом феррите-гранате, что сравнимо по порядку с магнитострикцией редкоземельных металлов.

Свойства ферритов со структурой граната приведены в табл. 29.10—21.31 и на рис. 29.20—29.30.

Таблица 29.10 Структура граната [111]

Пространственная группа	\aЫ —			
Типичная идеальная формула	{Cas}	**[AУ**	(Sis)	**Oi.**
Позиция пространственной группы	24c	16a	24d	96Л
Координаты		ООО	« i i	*xyz*

Продолжение табл. 29.i

Пространственная группа	laSrf- **or**			
Точечная симметрия (локальная)	222	3	4	1
Кислородная координация	8	6	4	—
Тип полиэдра	Додекаэдр (искаженный куб)	Октаэдр	Тетраэдр	—

Таблица 29.11. Уточнения кристаллической структуры граната Yg Feg Gig [112—115]

Постоянная решетки ***a*** = 12,376, 10>

	X	y	г
	— 0,0274 (9) - 0,0270 (4) - 0,0271 (1)	0,0572 (9) 0,0569 (5) 0,0567 (1)	0,1495 (9) 0,1505 (5) 0,1504 (1)

Меокатомные расстояния до ближайших соседей

Ион	Расстояние, Ю"» нм		Ион	Расстояние, 10-' нм
	2У3+ 2,357 (1) 2,017 (1) 1,865 (1)	2,436 (1)	*F^ [a]*	3,46 3,46 2,017
	2-2,692 (2 2,837 (2) 2-3,005 (2)	2,789 (2) 2,976 (2) 2-3,146 (2)	(d)	2-3,09 3,46 1.865 (1)
YS+	3,46 — 2-3,09 — 4-2,357 (1)	4-^79 2-2,436 (1)		

Межатомные углы

	Угол, град
Fe3+ \a — O^- — Fe3+ (d)	125,9 (1)
Fe3+ a - 02- —	101,5 (1)
Fe3+ й - O ^ - —	104,3 (1)
d	123,0 (1)
Fe3+ (d) - 02- — Y3+	93.5 (1)
Y8+ —Y3+	104,5 (1)
Fe3+ [a] - 02- — Fe3+ [a] (4,41)*з	147,2
Fe3+ (d) — Oa- — Fes+ (d) (3,41)*8	86.6
Fe3+ (d) - 02- - Fe3+ (d) (3,68)*s	78,8
Fe3+(d) - 02-— Fes+(d) (3,83)*з	74,7
Fe« (d) — 02- - Fe3+ (d) (3,83)*з	74,6

•1 Y3+ — 0 - , расстояние 2,436-10-» нм.
•2 Такая Же связь, расстояние 2,357-10-' нм,
*" Значения в скобках — наибольшие расстояния Fe"' или d) — 0«- в единицах 10"' нм.

Таблица 29.12. **Ионный радиус** R3+ **(координация 8), параметр элементарной ячейки *а* и рентгеновская плотность dx ферритов-гранатов** RgFeeOia [116-117]

Феррит-гранат	Ионный радиус 10-> нм	*а.* Ю-' нм	. г/смз
LagFe^Ota	1,190	(12,767)"	(5,67)*»
	1,137	(12,646)*!	(5,87)*!
«зРеДг	1,120	(12,600)*!	(6,00)*i
imaFesOia	1,087	12,529	6,23
•usFesOia	1,073	12,498	6,31
IdsFe^Ois	1,061	12,471	6,46

Продолжение табл. 29.12

Феррит-гранат	Ионный ра"днус 10-' нм	*а.* Ю-' нм	
TbsFcO,,	1,044	12,436	6,55
	1,030	12,405	6,61
	1,016	12,376	5,17
HO3FJ;BOI2	1,017	12,375	6,77
	1,004	12,347	6,87
TmgFlooL	0,991	12,323	6,94
УЪзРчОг,	0,982	12,302	7,06
LUgFesOja	0,972	12,283	7,14

^ Аппроксимированное значение.

Таблица 29.13. Межионные расстояния, Ю-i нм, до ближайших соседей при 673 К **данных по дифракции** нейтронов [118]

Составляющие граната	Гранат					
	Tb	**Dy**	Ho	Er	Tra	**Yb**
Fe3+ [a] - 02-	**2,371 (7)**	**2,360(11)**	**2,362(5)**	**2,351 (10)**	**2,340(15)**	**2,336(6)**
	2,464(7)	**2,441 (11)**	**2,436 (5)**	**2,415(10)**	**2,424 (15)**	**2,410(6)**
	2,025(12)	**2,030(15)**	**2,018(9)**	**2,019(12)**	**2,007(16)**	**2,025(8)**
Fe3+ *(d)* **— O-**	**1,862(12)**	**1,864 (12)**	**1,860 (9)**	**1,868 (12)**	**1,863(18)**	**1,850(9)**

le. В скобках указана погрешность в пооледией цифре.

Табл! 29.14. Вхождение различных ионов в YsFegOia

(10-1 нм), jcmax — максимальное вхождение на формульную единицу, предпочтен! для различических позиций [119]

Тетраэдрические d-позицин				Октаэдрические о-позиции				Додекаэдрнческие с-позиции			
Ион	ₒИ	^max	*a**	Иои		-шах	*a**	Ион		*max	o*
Fe3+	0,492	3		Fes+	**0,642**	2		YS+	1,016	3	—
BS+	0,П(?)	?							0,89	?	
	0,26	3	***Ca*^**						0,96		**Ge'+**
	0,27	>0,1 (?)	Fe«+					Lu8+	0,972	3	–
V5+	0,355	1,5			0,530	?		Ybs+	0,982	3	–
	0,390	< 3			0,530	?	***Ca*^***				
AlS+	**0,390**	3		(AFT	0,539	2	—				
				Tee-)	0,56	0,25					
	0,42	»0,2	Ca2+		0,582		Ca2+	Tbs+	**1,044**	3	–
a t r '	0,470	3			0,610	2		Gds+	1,061	3	
(Sn^+)	0,55	<1,0			0,708	2		Eus+	1,073	3	
Co^-)	0,58	«0,5			0,745	2	Ge4+	Sms+	1,087	3	–
	(0,585)	0,1	Ca^^		0,616	2	Ca^^-, **Na+**	Th4+	1,095	яг0,9	Ca2+
				Crs^	0,615	«0,6	—	Cd2+	1,10	3	**Ge^>-**
(Zn2+)	0,60	0,7	F-	Zn2+	0,740	2		Nd3+	1,120	==1,8	–
(Ir-1	0,625	?	**(Fe2+)**	Ire+	0,625	>0,05 (?)		Ca2+	1,124	3	V5+
				Mns+	0,645	»0,65 (?)	—	**Bi3+**	1,132	1,2—1,9	–
Pe2+	0,Ю	1	**F-**	**Pe2+**	0,730	«0,45		**Pr3+**	1,137	«1,1	–
(RU3+)		?		Ru8+	0,680	>0,02 (?)		Ce3+	1,143	«0,13?	–
				Ni2+	0,690	»1,5	**Ge^+**	**Na+**	1,18	3	**Tec+**
				Hf^	0,710	2	**Ca"**	**Las+**	1,190	0,45	
				Mg2+	0,720	«1,8	***Si*****	Sr2+	1,240	«1,0	
				Cu^^	0,730	<0,2 (?)	**Ge2+**	Pb2+	1,29	**K?)**	
				Zre+	0,745	2					
				Sc3+	0,745	«1,5-1,6	—				
				Jn3+	0,792	«0,9—1,0	—				
				Mii^*	0,830	«=0,4	Si"				

Примечание, o* — ионы, непользуемые для компенсации заряда.

Таблица 29.15. Температура Кюри, температура компенсации [119] и намагниченность насыщения [120] редкоземельных ферритов-гранатов при температуре 295 К

Гранат	г^, К	^комп.К	10V(4it) А/м
	558,9		**1750**
	573,4	—	**1675**
Eu^FecOio	**562,4**	–	**1170**
C()3Pe6012	**566**	**285,5**	**56**
ТЬзРевО,2	**568**	**248,6**	**198**
СузРевО^г	**553**	**230,2**	**376**
НозРевО,2	**553**	**132,2**	**880**
ЕгзРев012	**566**	**83**	**1240**
TugPeBOia	**548**	**7,6**	**1397**
УЬзРевО,2	**549**	**<20**	**1555**
1изРевО,2	**529,7**		**1815**

Таблица 29.16. Значения констант анизотропии различных редкоземельных ферритов-гранатов [119]

Феррит-гранат	*т*, к	Кх, 10« Дж/м»	*К*^, 10' Дж/м
YsFeeOij	295	-5,7^—6,3	—2,3
	273	-7,8	-0,26
	77	-22,1	-2,1
	4,2	-24,8	-2,3
	4,2	-26,3	-1,2

Продолокение табл. 28.1

Феррит-гранат	*т*. к	Кх, 10« Дж/м'	Кг, Ш-'Дж/м'
5тзРевО,2	300	-17-Ь -18,2	
	77	-1430	2100
	4,2	-4000	
ЕизРевО,^	293	-38	–
	4,2	-400	—156
0(1зРев012	320	-4,1	-1,0
	80	-44	—3,5
	4,2	—241	-3,7
ТЬзРевО^а	300	-8,2	
	80	-760	-7600
	78	+480	—4900
ВузРевО,2	300	< - 5	
	80	—970	214
НозРевО,**2**	300	< - 5	
	80	—800	-270
	4,2	—30000	
ЕгзРевОха	300	—6,0	–
	ПО	-22,0	
	77	36 (+45)	
	4,2	9000	500
ТтзРев012	293	-5,8(-11)	0
	77	-29,8(—210)	100
¥ЬзРев012	300	-6,1	
	80	—38,5	
	4,2	—6700	

Таблица 29.17. Поля и константы магнитной кристаллографической анизотропии Bi—Ca—V ферритов-гранатов при температуре 20° С

Феррит-гранат				1 -		Литература
	10V(4-) А/М	10V(4x) А/М		102 Дж/MS		
B%8 Ca2,2 Рез,9 V,.i	180	—240	- 5	-3,44	—0,07	[121]
Bio,5Ca2.5 Рез,75 V,.**25** o,2	400	—50	- 4	-1,59	-0,1	[121]
Bio.2Ca2.8 Fe^.6 V,.4 Oi^	630	—22	- 2	-1,10	—0,1	[121]
C%Pe3,5	750	-16	- r	0,96	—0,06	[122]
Bio.4 Ca2,6 Рез_б I"o,i Oi^	330	-38	- 2	-1,0	-0,05	[122]
Bio.4 Ca2.6 Рез,45 У,.з Гiр^^в O^^	80	—55	—4	-0,35	—0,02	[122]
Bio.2 Ca2.8 Рез.5 V,.^ SCp., O^^	470	-28	—2	-1,05	—0,07	[122]
Bio.2 Ca2,8 Рез_з5 Vi,^ SCo^gg Oj^	230	-25	—3	-0,46	—0,05	[122]
	600	-16	- 1	-0,76	—0.05	[122]
CазРез.25 SCo,25	380	-14	—2	—0,42	—0,06	[122]
CазРез.! V,,5 Sco.^ Oj^	150	— 10	—4	—0,12	—0,05	[122]

Таблица

	В, , 10- Дж/м«		в,. № Дж/м« 11		10-∞				тура
	300 К	77 К	300 К	77 К	300 к	77 К	300 к	77 К	
YaFe^Ois	3,4	1,7	6,4	12,7	- 1 , 4	- 0 , 7	- 2 , 4	- 5 , 3	[123]
Y3Fe4_,Gao,20i.	3,0	2,6	6,0	12,5	—1,15	—1,0	- 2 , 1	- 4 , 3	[124]
Y3Fe4.2Gao,80i,	2,2	2,6	2,86	6,0	- 0 , 8 5	—1,0	- 1 , 0	- 2 , 1	[124]
Y3Fe3.66Ga,.340i,	0,4	1,75	0,57	2,36	—0,15	- 0 , 6 7	- 0 , 2	- 0 , 8 2	[124]
Y3Fe4.8.Alo.,90i,	–	–	–	–	- 0 , 2	—1,45	- 3 , 4 5	- 6 , 1	[125]
Y3Fe4.25Al0.75O1.	–	–	–	–	- 1 , 2	- 2 , 2	—2,0	- 4 , 8	[125]
Y3Fe4.52Sco.48O1.	2,3	- 4 , 5 5	4,0	8,9	—0,91	1,75	- 1 , 4	- 3 , 2	[125]
Y3Fe4.3Sco.A.	1,2	- 5 , 5	1,9	4,2	- 0 , 4 5	2,1	- 0 , 6 7	—1,45	1125]
Bio.5Ca2.5Fe3.r5Vi,250i.	4,4	7,6	2,0	3,7	—2,6	- 4 , 5	- 1 , 2	- 2 , 5	[126]
Gd3Fe,Oi.	–	–	–	—	0	7,1	- 3 , 1	- 3 , 9	[127]

Таблица 29.20. Степенной закон для температурной зависимости намагниченности подрешеток ***Mi (T)/Mi*** (OK) = D (1 - ***TITc)^*** зна^ния параметров ***D*** и р для YaFesOia [130-Т-131]

	P	*D*	Температурный интервал
[a]	0,323+0,005	1,18+0,02	0,65<Г/Г^<; <0,97
Октаэдр	0,40+0,03	1,55+0,20	0,97<Г/Гс^ <0,9985
(d)	0,349+0.005	1,09+0,02	0,65<Г/Г^<; <0,99
Тетраэдр	0,47+0,03	1,95+0.20	0,99<Г/Г(,^ <0,9997

	KdM^	***KJM***		
YsFesOi^		**0**	**6,0**	**0**
		0	3,94	**0**
		0	3,	0
Y3Gao.8Fe4.2O,.		**0**	2,53	0
		0	**1,**	0
		0	0,76	**0**
Y3Ino.2Fe4.8O12	- 2 2	0	3,24	0
Y3Ino.4Fe4.6O1.	- 1 2	- 1	1,74	**0,1**
Y3lno.55Fe4.450«	—7	- 1	0,97	**0,1**
Y3Gao.eIno.,5Fe4.250i2	- 2 1	0	1,50	0
Y3Gao.6lno.3Fe4.,Oi,	- 1 6	- 1	**1,1**	0,05
Y3Gao.eIno.48Fe3,920i,	- 5	- 1	0,3	**0,06**
Y3Gao,«Ino.i5Fe3.950i.	- 2 3		0,84	0,03
Y3Gao.9lno.3Fe3.8O1,	- 1 8	—2	0,72	0,05
Y3Gao.9lno.4,Fe3.620i2	- 6	—2	0,27	0,07
Y3Gai.,Ino.3Fe3,60i2	- 2 4	—2	0,57	0,04
Y3Ga,.,Ino.48Fe3,420i,	- 1 0	—2	0,33	0,06
Y3Fe4,g95COo.o050i.	- 2 0	– 10		
Y3Fe4,99Coo.o,Oi,	5	- 2 3	0,70	-3,20
Y3Fe4,9,Coo.caOi,	105		14,63	-8,78
Y3Fe4.98Si0.0P1.	- 3 2		-4,46	-0,56
Y3Fe4.9sSio.05O1.	- 1 6		-2,17	—1,08

29.21. Коэффициенты упругой жесткости „. 1010 Па (10" дин/см^), при температуре 300 К

Феррит-гранат	с,.	Ci-.	***Cu***	Литература
YsFe.Oi.	26,90	10,77	7,64	[132]
Eu3Fe60i.	25,10	10,70	7,62	[133]
Y3Ga,Oi.	29,03	11,73	9,55	[1341
Y3AI5O1.	33,40	11,12	11,51	[135}
Y3Fe2.66Ga2.340i3	28,47	11,81	8,36	[136J

Таблица 29.22. Кубические коэффициенты упругой жесткости, 101" Н/м^, гранатов, не содержащих железа, при температуре 20 *"С*

Гранат	fii	«.4	fu		Литература
YsAUOi^	33,32—33,40	11,50—11,51	11,07-11,12	1,033	[139]
YsGaaOi,	29,03	9,547	11,73	1,10	[136]
GdsGa^Oi,	28,703	9,04	11.601	1,057	[137]
GdgGasOi, [100]	28,57	9,02	11,49	1,056	[138]
GdgGasOis [110]	28,59	9,03	11,49	1,056	[138]
GdgGasOij [TlO]	28,51	9,02	11,45	1,057	[138]
SmsGajOia	28,076	8,604	11,352	1,029	[140]
NdgGasOia	27,781	8,381	11,155	1,008	[141]

! A, = 2cц/(сц — fia) — коэффициент упругой анизотропии.

Таблица 29.23. Средние значения микротвердости, 10» Па, для плоскостей (110) и (211) и значения класса твердости для YsFesOis,, YgGasOia и Y3Al5O12 [142—143]

	(ПО)			Класс твердости по расширеиной 15-точечной шкал< Мооса
	1210+35			7,5
	1400±35			
	1450+45	1520+75	1490	8,0
YsAbOi,	1900+50	1650+85	1730	8,4

Таблица 29,24. Характерные дислокации в YgFejOia, выявленные поляризационно-оптическим методом [144]

Ось дислокации	[110]					[211]		
Плоскость скольжения	(001)		(110)		(112)	(111)		(311)
Вероятное направление вектора Бюргерса	[ПО]	[100]	[111]	[100]	[111]	[ПО]	[ПО]	[ПО]
Тип дислокаций, град	90	45	35	90	90	90	30	72

Таблица 29.25. Температура Дебая бд и экстраполированный к бд коэффициент теплопроводности X при этой температуре для различных гранатов [145]

В скобках даны расчетные значения

Гранат,	R		X, ВТ/(cm-K)
RsAUOaa	Y	750	0,042
	Gd	(640)	0,045
	Er	630	—
	Tm	620	
	Tb	620	—
	Lu	(620)	0,043
RsGasOis	Nd	715	
	Yb	715	0,039
	Y	585	0,046
	Gd	520	0,051
RsFesOiz	Y		0,038
	Eu	—	—
	Lu		
		—	—

Таблица 29.26. Коэффициент теплопроводности для YsFejOia [145] в зависимости от температуры

T. к	и, Вт/(см-К)	1 "	и, Вт/(см К)
2,5	0,075	70	0,41
6	0,56	100	0,26
10	1,2	150	0,150
21	2,2*1	200	0,106
30	1,80	300	0,074
40	1,12	565	0,038*3
50	0,63		

Таблица 29.27. Коэффициент линейного расширения поликристаллических гранатов Y3_^GdjfFe50i2 и YgFe^^^Al^Ois [146]

	Коэффициент линейного расширения а. Ю-" град-1		
	298 К	1	623 К
YsFesOi,	8,30		11,0
Y2.24Gdo.76Fe50i,	8,00		11,0
	8,10		10,4
Y3Fe4,7Alo.30i.	7,95		10,0
Y3Fe4_3AlQ_,Oi2	8,10		10,0
YgFeiAliOij	8,40		11,1
	8,30		10,5

Таблица 29.28. Значения удельного сопротивления и диэлектрических потерь для граната УзРваОхг 1147—148}

Температура, К

Поликристаллический образец

	16,7	
tgew	5 10-^	
	7,2 10-^	373
	2,0 10-^	473
	6,2 10-^	573

Монокристаллический образец

р. Ом . м:	**1,0** • 10W	304
	1,0 • 10'	373
	2,6 •	473
		573

•• **Погрешность** е" + 3 • КТ^.

Таблица 29.29. Типичные значения магнитостатических параметров некоторых пленок ферритов-гранатов с цилиндрическими магнитными доменами [119]

h — толщина пленки; *I* — характеристическая длина материала; Нкол — "оле коллапса; а^ — энергия доменной стенки; d„oj] —диаметр коллапса; Ки — коэффициент одноосной анизотропии; бц? — ширина доменной стенки

Состав материала	1	1	i	•s Ш	^кол- 80А/М		"кол , мкм		Ч	S S	İ S h
					наблю-даемое	расчет-	наблю-	расчет-ное			
	219	16,0	1,78	0,111	160	111	6,0	8,6	0,68	28,8	0,018
Cdz.sJbo.eeFesOi,	137	15,0	1,53	0,102	75	72	7,5	7,6	0,23	3,3	0,054
ErgFe^gGao^Oia	132	4,4	1,50	0,341	32	32	6,0	6,0	0,21	2,8	0,058
Er.TbFes^gAlj^Oij	136	17,0	1,27	0,075	82	79	7,0	7,0	0,19	2,2	0,067

1

	128	5,2	0,87	0,167			3.8	0,12	0,90	0,099
	150	3,6	**0,80**	**0,222**			3.3	0,14	1,3	**0,086**
Y,.52Gdo.86Vbo.62Fe4.nG«0.890l.	145	4.1	0,79	0,193			3.4	0,12	0,59	0,175
Y,.5:,L"o,39Lao,o6CaFe4GeO,,	150	3,8	0,72	0,189			3.0	0,13	**1,0**	0,098
	173	6,0	0,70	0,117			3,4	0,17	1,8	0,073
Eu,ErFe,_3Gao_.0,, i*	163	4.0	**0,66**	0,165			2.9	0,13	0,44	0,249
	247	**18,0**	0,64	0,036	172	5,0	4,7	0,31	6,0	0,040
	218	4,23	0,64	0,151	96		2,9	0,25	1,3	0,146
Eu,,45Ca,.,Yn.45Fe3.9Sio.6Geo.50i2	240	2,8	0,63	0,225	83		**2,6**	0,29	5.2	0,044
	189	9,4	0,53	0,056	119		3,2	0,15	0,47	0,130
	175	2.1	0,51	0,243	58		**2.1**	0,12	0,96	0,101
	181	11,5	0,35	0,030	131	3,0	2,7	0,091	0,52	0,138
&..3Gdo.95Tbo.75Fe4.5Alo.50,.	330	3.0	0,35	0,117	163		1,7	0,30	2.3	0,104
Y..2Luo.65Snio.4Fe4.,(CaGe)o,gOi,	700	0,67	0,13	0,194	**268**		0,55	0,50	5,35	0,074
Tm2,,5Fuo.85Fe4.45Gao.5oOx.	784	**1.1**	0,12	0,109	400		0,59	0,58	7,06	0,065
	1750	4.2	0,05	0,012	1435		0,58	1,25	30,4	0,031
	1378	0,87	0.047	0,054	879		2,9	0,71	**18,1**	0,031

29.30. Фарадея (X = 1,152 мкм) -гранатах [150]

Да = Оподло» — flпленка

Состав пленки	T	1	й &	*J^*
YsPe^Oi,	+0,004	1780 ±	+250	0,02
	—0,010	17501.	+150	0,008
Bio.45 Y2,55 Fe,Ga,0,3	—0,027	310±	—340	1,2
	-0,021	1780 Ii	+ 175	0,01
^зРез.дз SCO,,, Gao., O,,	—0,012	620 II	+ 95	0,02
	—0,009	40011	+ 80	0,04
	+0,002	180 I	+ 70	0,14

Продолжение табл. 29.30

Состав пленки	i *I i*	1 s	•1 & 2	u.
Gdo.6 Y2.4 Fe4,3 Gao.7 O^,	—0,006	450 II	+ 180	0,16
Gdo.7 Y2.3 Fe,,, Ga,,2 O^,	**-0,013**	**100 II**	**+ 140**	**1,96**
Gdo.7 Y2.3 Feg., Ga,,2 O,,	-0,009	30 II	+ 53	3,12
Yb2.6 Pro.4 Fe4GaiOi2	+0,022	280 II	— 123	0,25
Yb2,3 Pro,7 Fe4GaiOi2	—0,017	260 II	-125	0,23
Yb^PriFe^GaiOi,	—0,042	386 II	— 135	0,12
(YbPr)2_5 Bio,5 Fe4GaiOi2	-0,031	270 II	-675	6,25
(YbPr)2.3 Fe3_g	—0,002	15011	—950	40
	-0,019	220 II	-1190	30

Таблица 29.31. Намагниченности иттриевого граната Mg и подрешеток Л!^ и и обменные интегралы Jii по результатам измерении различными методами [151]

Метод	i-кМ^ (29БК). мТл	M^ {295 К) (0 К)	Мд (295 К) M^ (0 К)	M^ (295 К) M^ (0 К)	•ad' гм-1	•'м-	
Ядерного магнитного резонанса [1861	—	0,725	0,89	0,835	—	—	—
То же [187]	—	0,733	0,888	0,837			
» [188]	—	0,730	0,895	0,84		—	—
Дифракции нейтронов [189]	–	0,76	0,94	0,88	—	—	—
Маятникового магнетометра [1901	181,2	0,734	–	–	—	—	—
То же [191]	179	0,725	–	–	—	—	—
Магнитных весов [192]	177	0,717	—	—	25,36	8,45	11,86
Вибромагнетометра, магнито-статических мод, индукцион-ный [193]	180+1	0,729	—	—		—	
Теории молекулярного поля [151]	176,7	0,729	0,896	0,84	25,64	7,8	11,0
Рассеяния нейтронов [191]					27,24	4,38	13,07

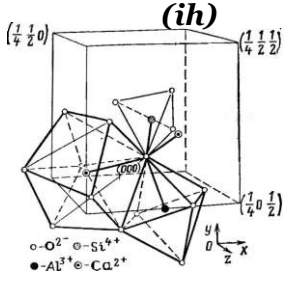


Рис. 29.20. Координации ионов в различных подрешетках в структуре граната CasAbSisOiz [152]

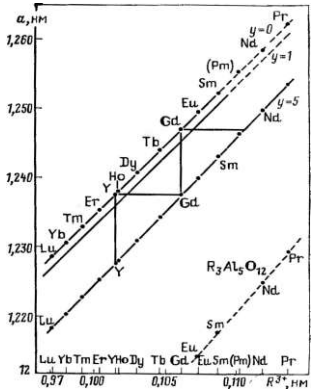


Рис. 29.21. Размеры элементарной ячейки ферритов-гранатов iRsFes-!,Gai,0,2; r^'з+=6,42-10-= нм; r^^3+=6,17X X10-2iim;/-X,V=5,40-10-2 нм; = 1,192-10-2НМ[153]

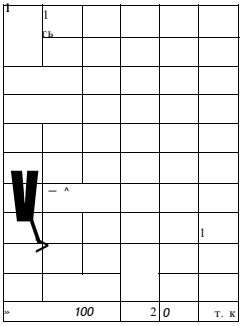


Рис. 29.22. Температурная зависимость спонтанной намагниченности в магнетонах Бора на формульную единицу в ферритах-гранатах Gd, Tb, Dy, Ho и Er [154]

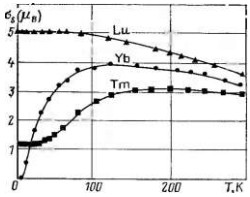


Рис. 29.23. Температурная зависимость спонтанной намагниченности в магнетонах Бора на формульную единицу в ферритах-гранатах Tт, Yb и Lu [154]

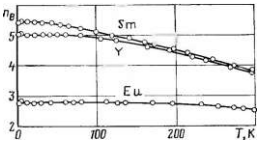


Рис. 29.24. Температурная зависимость намагниченности насыщения в магнетонах Бора на формульную единицу для монокристаллических образцов в форме сфер, имеющих возможность свободно вращаться во внешнем поле. Данные для иттриевого феррита-граната получены на поликристаллическом образце [155]

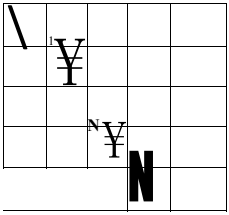


Рис. 29.25. Температурные зависимости первой и второй констант магнитной кристаллографической анизотропии в YsFesOis [156]. Значения Кг при низкой температуре сильно зависят от концентрации примесей, в особенности двухвалентного железа Fe2+

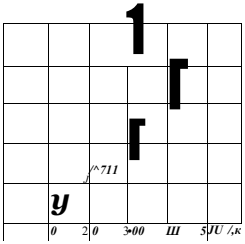


Рис. 29.26. Температурные зависимости магнитострикционных коэффициентов Хоо и Хщ в иттриевом феррите-гранате YsFesOis [157]

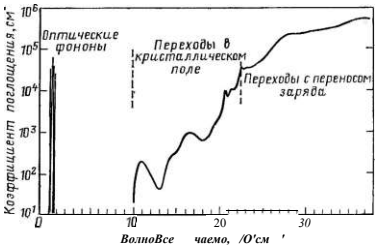


Рис. 29.27. Зависимость коэффициента поглощения (Ig a) от волнового числа в YsFesOij. В диапазоне от 10 000 см-' до 40 000 см-' данные приведены при температуре 77 К. Полосы фононного поглощения показаны схематически [158]

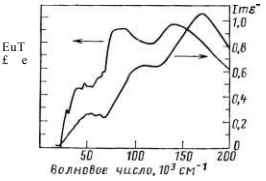


Рис. 29.28. Коэффициент поглощения YjFesOij при высо-^ ких энергиях [159]

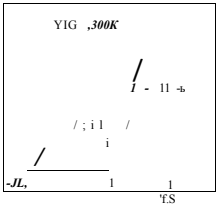


Рис 29.g). Эффект Фарадея в иттриевом феррите-грана-

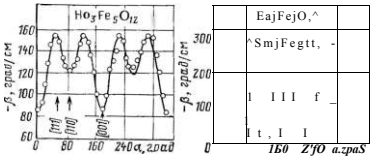


Рис. 29.30. Анизотропия магнитного линейного двупре-ломления на волне 1,15 мкм при Т=300 К в ферритах-гранатах гольмия, европия и самария [161]

29.4. ГЕКСАГОНАЛЬНЫЕ ФЕРРИТЫ

Большая группа фсррималпитных оксидов обладает гексагональной кристаллической структурой. На рис. 29.31 приведена диаграмма, на которой указаны химические составы таких веществ. В углах расположены соединения BaO, MeO и PerOз, Символ Me означает двухвалентный ион первой переходной группы или ионы Zn2+ и Mg2+, а также комбинацию этих ионов , Li+ и Fe'+). На линии диаграммы, соединяющей BaO и PerOз. отмечена точка, соответствующая аатиферромагнитному бариевому ферриту BaPe204. Точка S на линии MeO^-PerOз соответствует соединению Me2pe408 с кубической кристаллической структурой типа шпинели. Точка *Л4* отвечает оксиду, имеющему гексагональную структуру и химический' состав BaPe,20,9= = Ba0-6Pe20я. 1очка У на диаграмме соответствуетсо-

BajMejPeisOsa=2(BaO• MeO• SPesOs).

И вестно также большое число соединений с состагежащими на линиях Л'!—S и М—У, а элементар*гйка* этих соединений может быть легко построена ;к структуры S, Ж и У. В большинстве случаев В • ('•=0,]43 пм) может быть частично или полночи,ю ;^амещен ионами Ca^+(r=0,106 нм), Sr2+(r= =u,iz/ нм) или Pb2+(/=0,132 нм) или трехвалентными ионами, например Ьа3+(л=0,122 нм).

Энергия кристаллографической магнитной анизотропии гексагональных кристаллов описывается формулой

$$Ea = Ki \sin^2\theta + к^ \sin^4 0 + \quad \sin^6 e + 4\text{-}A{:}3\sin^{\prime\prime}6\cos\alpha(\varphi\text{-}<\{;\}, \qquad (29.12)$$

где —энергия анизотропии; Ki, Кг, К^ к Къ — коэффициенты анизотропии; G и ф — полярные координаты. Для полей анизотропии

$$0o = 0; \qquad \frac{2/<1}{Ms'} \qquad \frac{2\,(/^1 + 2/^2)}{M,} \cdot \qquad (29.$$

$$\sin \qquad \frac{K_2 +}{Ms}$$

Здесь Н^ — напряженность эффективного поля, необходимого для поворота вектора намагниченности в те направления, где меняется только 6, а — иоле, вращающее вектор намагниченности на поверхности конуса. Значение Н^ определяется формулой

(29.14)

Свойства гексагональных ферритов отражены в табл. 29.32 — 29.44 и на рис. 29.31 — 29.44.

В численных значениях табулированных параметров возможны некоторые неточности, связанные с неопределенностью состава и физического состояния образцов, на которых производились измерения. Различная термическая обработка также может изменить такие параметры, как распределение катионов между узлами, пористость и т. д. Поэтому во всех случаях, когда необходима более подробная информация, следует обращаться к оригинальной литературе.

29.32. Некоторые характеристики ферромагнитных оксидов с яьной структурой

	Символ	Число слоев в элементарной ячейке	Пространственная группа	Параметр с. им		Молекулярная масса *M*, *а.* е. м.	Литература
	M s	(10) –	Рбз/тшс —	2,32 —	5,28 5,24	1112 232	[164] [166]
	w	(14)1	*PGslmrnc*	3,2845	5,31	1575	[165]
Ba.,Fe2Fe28046	X Y	(12)з (6)3	*R3m* *R3m*	8,411 4,3588	5,29 5,39	2686 1408	[165] [165]
Ba3Fe,Fe,404i	Z	(22)i	*Рбз/mmc*	5,23	5,33	2520	[165]
BagZn2Fe4„Oe5	-	(17)2	*P6^/mmc*	7,936	-	-	[167, 168]
Ba4Zn2Fe3Ao		(16)з	*R3m*	3,81	5,31	3622	[167J
Ba4Zn,Fe5,034	-	(22)з	*R3m*	15,385	—	-	[167, 168]
Ba5Zn2Fe,40,,,3	–	(27),	*Рбз/mmc*	12,576	–	–	[167, 168]
Ba,ZneFe,,,0,,,4	—	(28)з	*R3m*	20,04	–	—	[167J
Ba,,,ZneFe,A2e	-	(34)з	*R3m*	24,398	-	-	[167]
Bai,Zn,,,Fe340i48	–	(40)i	*R3m*	9,584	–	—	[167]
Ba,4Zn.,Fe,,0„o	–	(46)з	*R3m*	33,109	-	–	[167]

la 29.33. Состав и структура гексагональных ферритов типа Me^Yn, где Me—Mn, Zn

Состав	Последова тельность блоков	Количество """слое?"""	ПРостранст-группа	Параметр f, им	
				Эксперимент	Расчет
Ba2„(Mn, Zn)i8Fei320236	M(Y)4M(Y)5	(64)3	*R3m*	46,2	46,2
Ba,,(Mn, Zn),,,Fei440,58	M(Y),M(Y)5	(70)i	*P6:ilmmc*	16,86	16,85
Ba,4(Mn, Zn),,Fei5,0,8„	M...M(Y)ii	(76)з	*mm*	54,93	54,92
Bar4(Mn, Zn),2Fe„e02so	M(Y)iM(Y)„	(76)i	*P3m/*	18,31	18,31
	M(Y)4M(Y),	(76)i	*P3m*\	18,31	18,31
&^4(MII, Zn)22Fex5eO280		(76)3	*R3m*	54,93	54,92
	M(Y)eM(Y),	(88)3	*R3m*	63,67	63,64

29.34. Рентгеновская плотность rf, и молекулярная масса M некоторых оксидов с гексагональной кристаллической структурой [5]

Металл	W=BaMe,Fe,eO,,		Y=Ba,Mes,Fe,jO,i,		Z=Ba3Me2Fe,j04j	
	dx. 10» КГ/М»	*M,* а.е.М.	*dx-* 10" КГ/М»	*M,*	*dx.* l0= кг/м"	д/, а.е.М.
Mg	**5,10**	**1512**	**5,14**	**1346**	**5,20**	**2457**
Mn	5,31	1573	5,38	1406	5,33	2518
Fe	5,31	1575	5,39	1408	5,33	2520
Co	5.31	1577	5,40	1410	5,35	2522
Ni	5.32	1580	5,40	1414	5,35	2526
Cu	5,36	1590	5,45	1424	5,37	2536
Zn	5,37	1594	5,46	1428	5,37	2539

а б л и ц а 29.35. Значения температуры Кюри и намагниченности насыщения гексаферритов типа MejW [5]

Металл	J^c. К	10-" КА ММКР		кА'м	"в : 1'8 (Г =:0 К)	
		0 К	293 К	0 К	Экспе-ричент	Расчет
Mn,	690	97	59	310	27,4	29,2
	730	98	78	416	27,4	28
NiPe^^	790	79	52	275	22,3	26,4
ZnFe2+	700	108	73	382	30.7	31,6
	720	104	68	362	29,5	29,2

| б л и ц а 29.36. Значения температуры Кюри и намагниченности насыщения гексаферритов типа Me^Y [5]

Металл	Тс. К	10-8 кА		кА/м	пв .	т = 0 К)
		0 К	293 к	0 К	Экспери-	Расчет
Mg	550	20	23	120	6,9	2,2
МП	560	42	31	167	10,6	9,2
Co	610	39	34	183	9,8	7,4
Ni	660	25	24	127	6,3	4,6
Си	—	28	—	—	7,1	2,6
Zn	400	72	42	227	18,4	20,0

Т а б л и ц а 29.37. Значения температуры Кюри и намагниченности насыщения гексаферритов типа IVkejZ 15]

Металл	Тс. К	10-3 Kf-м2/1<г		кА/м	пв-	(Т =0К)
		0 к	. з к	0 К	Экспери-мент	Расчет
Mg	—	55		—	24	26,9
Co	680	69	Г)0	267	31,2	29,8
Ni	–	54	–	—	24,6	26,1
Си	710	60	46	247	27,2	27,1
Zn	630	-	58	310	–	–

Т а б л и ц а 29.38. Магнитные свойства ферритов типа SrO-wFejOs и РЬО • иРе^Оз [170—172]

	м , кА/м	м , кА/м	н , КА'/М
(8rO-4PeO3)	259	179	239
SrFeiaOio (SrO • 6Pe^O3)	247	183	229
(SrO • ЭРе^Оз)	151	120	267
PbPeeOig (PbO • 4Pe20з)	279	159	119
PbPei,Ois (PbO • 6Pe,Oз)	199	143	231
PbPe1зO,з (PbO • 9Pe20з)	135	80	191

Т а б л и ц а 29.39. Константа анизотропии *Кэ*, намагниченность насыщения и поле анизотропии Н^ для некоторых гексагональных ферримагнитных оксидов [5]

Соединение	т. к	„" S	Ks. Дж/м-	~ ^ А / м
	77	210	200	27 100
	293	187	80	12 300
	443	145	15	2940
BaзCo,^5Pe2+Pe24041	293	280	5,5	558
	431	220	0,9	160
BagCoi^ggPe^+gFe^iO^	293	280	12,0	1270
Ba2CoZno.5Fe2+Fe,.04i	293	290	2,5	239
Ba,Zn,,5Pe2+Pei,0,,	293	190	0,6	80

Т а б л и ц а 29.40. Значения констант анизотропии Ki или Ki + ^K^^ намагниченности насыщения Mg и напряженности поля анизотропии Н^ некоторых гексагональных оксидов при температуре 293 К [5]

Оксид	Символ	Ku 105 дж/„3	К1+2Кг, 10» Дж/м=	М^. кА/м	Н^, кА/м
BaPe,,o;'	M	+3,3	—	380	1350
BaFc,eO;|	Pe^Wa	+3,0	–	314	1510
BaZnPei,027	FeZnW	+2,4	–	380	1000
BaZni.sPe,650„	Feo,5Zn„5W	+2,1	—	380	885
BaMnZnFeigO^	MnZnW	+ 1,9	–	370	811
BaNi,Pe„02,	NigW	+2,1	–	330	1010
BaNio,5ZnPe,6,50„	ZnPeo^sNio^sW	+ 1,6	–	350	725
BaCO0.75Zn0.75Fei6.5O2j	Feo.5COo.75Zno.75W	—	- 0,4	360	175
	Mg.Y	–	- 0,6	119	800
	NizY	—	- 0,9	127	1110
BajZnaFeijOaz	Zn^Y	—	- 1.0	227	715
Ba2Zn,,5Fe,2,502!	Feo,5Zn,,5Y	-	- 0,9	191	756
BajCosPeiaO;^	Co^Y	-	- 2.6	185	2230
BaзCo2Pe,,o;|	Co,Z	-	- 1,8	270	1030

Ичмерения проводились на монокристаллах.

Таблица 29.41. Магнитные свойства монокристаллов гексаферритов BaFei^-sxIr^+Zn^+Oig с большой анизотропией в базисной плоскости [173]

	"a' (Г= 300 К)	А/м	AH, кА/м (Т - 300 К)	Тс, К	A-MS (7=300^К)
0	1350	1350	4,2 при 55 ГГц	720	65
0,16	765			635	—
0,52	1200	1270	83,5 при 17 ГГц	560	65
0,56	1270	—	—	550	60
0,60	1600	1750	93,5 при 14 ГГц	520	47

Таблица 29.42. Ширина линии ферромагнитного резонанса для монокристаллов Me^Y [174]

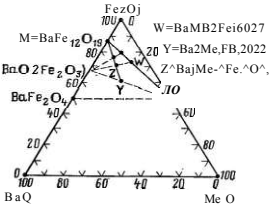
Монокристалл	Параметра, нм	AH, А/м (Г = 300 К)
Ba^Zn^Fei^O^z	4,36	638 (9000 МГц)
Ba^CZn, Mn)Fe,2022 (3,5% Мп по массе)	4,3564	303 (9000 МГц) 390 (17 300 МГц)

Таблица 29.43. Свойства некоторых гексагональных ферритов, используемых в волноводах в миллиметровом диапазоне длин воли [175]

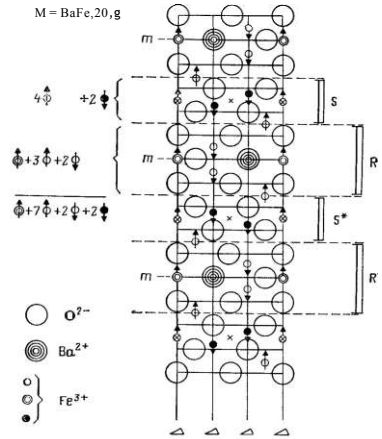
Состав	^обш' К	р, —	Степень ориентации	tg 6 (f = 9,5 ГГц)	(/ = 9^5 ГГц)		Я, . ^	Тс. к	fpee- ГГц
Система BaO-2bЮ-xA120з-(8—л:)Ре20з, ***обозначаемая*** NiW(A:Al)									
NiaW (0,40A1)	1573	4,58	0,69				1210	750	49,0
NisW (0,60A1)	1623	4,58	0^88	0,001	15,4	214	1360	730	52,0
Ni^W (0,73A1)	1623	4,60	0,83	0,003	14,9	195	1430	720	55,0
Ni^W (0,86A1)	1623	4,63	0,84	0,004	15,1	181	1510	710	58,0
NisW (1,00A1)	1623	4,55	0,86	0,002	14,5	i66	1570	690	62,0
Система S v O - o б o з н a ч a e м a я 8rM(л:A1)									
SrM (0,00A1)	1623	4,91	0,79			334	1510	750	60,0
SrM (0,20A1)	1573	4,48	0,87	0,001	18,6	263	1600	730	64,0
SrM (0,53A1)	1573	4,11	0,89	0,001	16,2	168	2010	690	74,0
SrM (0,80A1)	1573	4,00	0,91				2470	650	86,0
SrM (0,95A1)	1573	3,95	**0,88**	-	-	—	2780	630	93,0

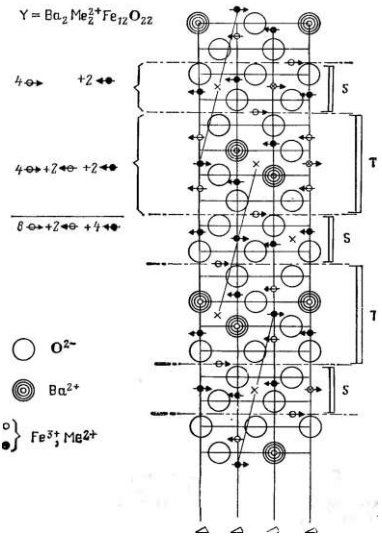
Таблица 29.44. Поле анизотропии Яа и tgB некоторых гексаферритов типа М, используемых в миллиметровом диапазоне длин волн

Гексаферрит	Н^, кА/м		fpes' ПТЦ
BaZno,3Tio,3Fe„.40io	1090	0,002	45
	1390	0,002	55
S'-Nio,3Geo,3Al,,86F69,540io	2170	0,006	82
SrNio,iGeo,3Al2,5Fe9,lOie	2595	0,008	96



;. 29.31. Диаграмма составов ферримагнитных оксис гексагональной структурой. Символ Me обозначает двухвалентный ион (или комбинацию двухвалентных ионов) [166]





-Рис. 29.32. Сечение структуры магнетоплюмбита М с осью с, направленной вертикально [5]:

стрелки — направление вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка крестики — положения центров симметрии; через слои, содержащие бария. зеркальные плоскости, обозначенные буквой структура состоит из шпинельных блоков S, разделенных бло камн, содержащими ионы бария; звездочки — поворот данного блока вокруг оси *с* на 180°

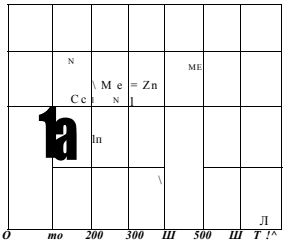


Рис. 29.34 Зависимость намагниченности насыщения Стз соединений со структурой типа Y от температуры [5]. Измерения проводились на поликристаллических образцах в поле напряженностью 875 кА/м (11 кЭ)

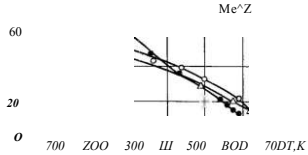


Рис. 29.35. Зависимость намагниченности насыщения CTS соединений со структурой типа Z от температуры. Измерения проводились иа поликристаллических образцах в поле напряженностью 875 кА/м для CoaZ и ZnsZ и 1430 кА/м—для CusZ [5]

Рис. 29.33. Сечение структуры типа Y с осью с, направленной вертикально [5]:

стрелки — направления спинов, которые в данном случае ориентированы перпендикулярно осям с; вертикальные линии - оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; изображенная структура состоит из последовательно расположенных блоков S и T

W=BaMofFe,5U2

- " - ϱ j - ^ : ,

I+jS

O O"

ϕ

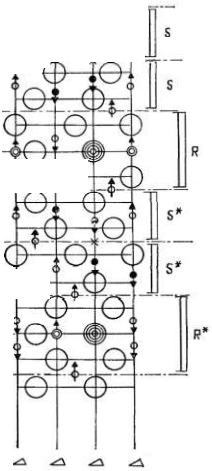


Рис. 29.36. Сечение структуры типа W с осью с, направленной вертикально [5]:

сумму структур

Z^BajMe^Fe.^O^,

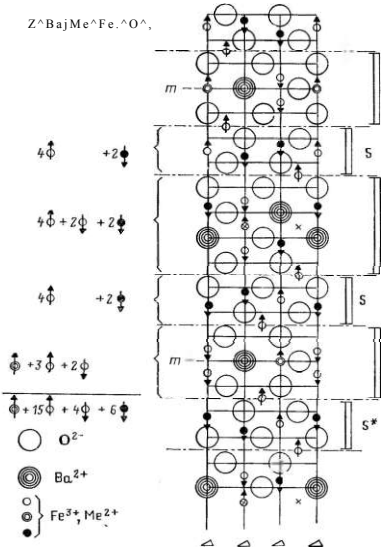


Рис. 29.37. Сечение структуры типа Z с осью *с*, направленной вертикально [5]:

стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центра симметрии; звездочки — поворот данного блока вокруг оси *с* на 180°; структуру можно рассматривать как сумму структур

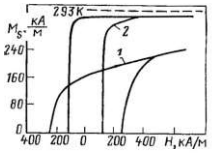


Рис. Гистерезисные петли для образца BaPe,20,9 И:

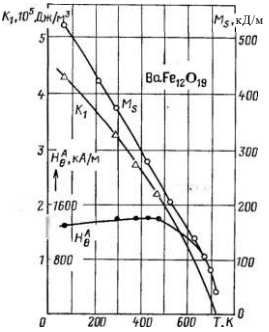


Рис. 29.39. Зависимость намагниченности насыщения Ms, константы анизотропии K\ и поля аиизотропии H^ для BaFeijOig от температуры

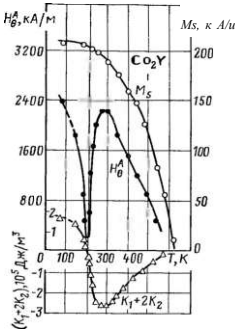


Рис. 29.40 Зависимость намагниченности Ms, констант анизотропии {K\+2K2) и поля анизотропии Нц для CozY от температуры [5]

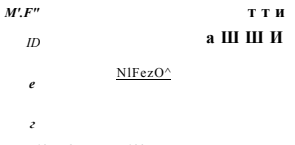


Рис. **29.41.** Магнитные спектры поликристаллического образца C02Z и шпинели NiFe204, которая имеет примерно такую же магнитную проницаемость на низких частотах [5]

29.5. НЕКОТОРЫЕ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица **29.45. Магнитные свойства соединений трехвалентного хрома с галогенами [177]**

Ор — парамагнитная точка Кюри; IKxltAs — напряженность поля анизотропии; РэФ — эффективный магнитный момент

	Структура	10~ Pjf	кг/м»			"в'		2Kt КА (Г=1.Б К)	(7-=1,5 К)	РэФ,
CrPз	— *R3 c;* a = 0,52643 нм; a = 56,563°	—	69,8	—124	—	—	—	—	3,85
CrCIз	o	~P3i12; *DI-•*/'212; a = 0,6 нм; c = 1,73 нм	2,95	16,8	+31	—	308	—	—	3,69
CrBrз	*c h - m ;* *a* = 0,626 нм; *c* = 1,82 нм	4,75	35,7	+47	3,0	**259**	546	9.4-10^	3,85
CПз		5,36	68	+70	3,1	214	2260	3,1-10®	4,03

Таблица 29.46. Магнитные свойства CoMnOз, NiMnO, BiMnOa и BiCrOg

Соединение	Структура	Параметры ячейки (Г = 300 К)	г^, К	"в- ^^в	Рэф. l^B	Литература
CoMnOз		C = **0,5385** нм; **a=54°31'**	**120**	**0,72 (0** К)	—	**[180-182]**
Ni.MnOs		a = 0,5343 нм; a = 54°39'	**120-160**	**0,76 (0** К)	—	**[180-182]**
BiMnOa	Перовских	*a = c* = **0,3935** нм', **6=0,3989** нм; **a = 7 = 91°28';** **p = 90°58'**	103	**2 (77** К) **4** (экстраполяция)	5	**[178, 179]**
BiCrOa	»	a = c= 0,3906 нм} 6= 0,387 нм; a=-f = 90°33'; p = 89°9'	123			**1178, 179)**

Табл ицг 29.47. Кристаллографические и магнитные свойства ферримагнитных фторидов с ионами Fe3S Cr3+ и Co^^ [183]

Соединение	Параметры ячейки				
	в высокотемпературной фазе	в низкотемпературной фазе		"в' "^в (0 К)	М^, кА/и (0 К)
NaeFesFi^	0 = 0,734 им; с = 1,038 им; р = 3260 кг/мз	0 = 7,323 нм; 6= 0,746 нм; с = 1,272 нм; р = 90 + 0,5°; Р = 3150 кг/мз	80	5	199
NaettsFu	-	-	< 2 0	-	
^бСозРм	—		*17 аТс* < 200		

Таблица 29.48. Магнитные свойства соединений двухвалентного европия

СоединениЕ	Структура	Параметры ячейки, им	г ^ . к	θ_p, к	$\mu_B \cdot N_B$ (Г = 0 К)	Литхгра-тура
ЕиРг	Кубическая	0,585	2	- 5	—	[184]
EuCls	Ромбическая	*а* = 0,448 ***Ь*** = 0,748; с = 0,896	—	0		[184]
ЕиВГг	Ромбическая	а = 0,43; 6 = 0,92; с = 1,142	—	0	—	[184]
ЕиЬ	Моноклинная	***а*** = 0,762; ***b*** = 0,823; с = 0,788; β = 90	5	+ 5	7	[184]
ЕиО	NaCl	0,514	73	+ 7 6	6,8	[184]
EuS		0,595	16,5	+ 1 9	6,87	
EuSe		0,619	7		6,7	
EuTe		0,66	9,5	- 6	6,9	
Еи^РгО,	Тетраэдрическая			—3		[185
Еиэ(Р04)2	Ромбоэдрическая	—	—	+ 5	6,7	185
Eu,Si04	Ромбическая (порошок)	а = 0,9715 6 = 4,956; с = 0,595	7	**+ 7**	6,0	[184
EujSiOi	Ромбическая (монокристалл)	а = 0,971; 6 = 4,956; ***с*** = 0.565		+ 1 0	6,5	[184]
EusSiOs	Тетраэдрическая		4	+ 1 9 0	6,71	[184] [185]
ЕиэА1?Ое EujAlaOs	Псевдокубическая	—	—	10 6	Ц I 5,8)	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неель Л. Антиферромагнетизм: Пер. с англ. f Изд-во иностр. лит., 1956.
2. Вонсовский С. В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
3. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах аитиферромагиетиках. М.: Наука, 1973.
4. Wangsness R. K.//Phys. Rev. 1954. Vol. 93. P. 68
5. Смит **Я., Вейн** Х. Ферриты. М.З Изд-во иностр. лит., 1962.
6. **Shull C. G., Wollen E.** О., **КоЫer .W. C.** — Phys, Rev. 1951. Vol. 84. P. 912—921.
7. **Blckford L. R., Brownlow J. M., Penoyer R. F.**// Proc. Instn. Electr, Engrs. J957. Vol. J04B, Suppl. 5. P. 238.
8. **Bickford** L\ R., Pappis J., **Stull** J. L.//Phys. Rev. 3955, Vol. 99. P. 1210—1217.

9. Bickford L. R.//Ibid. 1950. Vol. 78. P. 449—457.
10. Calhoun B. A./7Ibicl. 1954. Vol. 94. P. 1582—1585.
11. Nathans R. e. a.//Proc. Instn. Electr. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. N" Б. P. 217—219
12. Verwey J. W., Heilmann E. L,//J. Chem. Phys. 1947. VoJ. Ib. P. 174—180.
13. Gorter E. W.//Phi(ips Kes. Hepts. 1954. Vol. 9 P. 295-296.
14. Gait J. K., Matthias B. T.. Remeika J. P.//Phys. Rev. 1950. Vol. 79. P. 391—392.
15. Bozorth R. M., Tilden E. F.. Williams A. J.//Ibid. 1955. Vol. 99. P. 1788—1798.
16. Dwight K., Menyuk N.//Bull. Amer. Phys. Soc. 1958. Vol. 3. Ser. 2. P. 41.
17. Smit J., Wijn H. P. J.//Advances in Electronics and Eiectr. Phys. 1954. Vol. 6. P. 83—84.
18. Vager W. A., Gait J. K., Merritt F, R.//Phvs. Rev. 1955. Vol. 99. P. 1203—1210.
19. Генделев С. Ш., Лаповок Б. Л., Рубинштейн Б. Е.//Физика твердого тела. 1963. Т. 5. С. 3037—3038.
20. Sekizawa H., Sekizawa K.//J. Phys. Soc. Japan. 1962. Vol. 17. Suppi. B-1. P. 380—383.
21. Epstein D. J.//Conf. en Magn. and Magn. Mater., Boston, Amer. lust. Eiectr. Engng. 1957. P. 498—499.
22. Van Uitert L. G.//J. Chem. Phys. 1956. Vol. 24 P. 306—310.
23 Hastings J. M., Corliss L. M.//Phys. Rev. 1956. Vol. 104. P. 328—331.
24. Dillon J. F., Geschwind S., Jaccarino V.///Phys Rev. 1955. Voh 100. P. 750—752.
25. Гуревич А. Г., Гублер И. Е., Титова А. Г.//Физика твердого тела. 1961. Т. 3. С. 19—31.
26. Teale R. W.//J. Appi, Phys. 1962. Vol. 33, Suppl. N" 3. P. 1295-1298.
27. Завета К., Свирина Е., Маликова 0.//Физика твердого тела. 1962. Т. 4. С. 3593—3595.
28. Braun P. B.//Nature. 1952. Vol. 170. P. 1123.
29. Folen V. J.//J. Appl. Phys. Г960. Vol. 31, Suppl. P. 1665-1675.
30. Schnitzler A. D., Folen V. Jl, Rado G. T.//J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31, Suppl. № 3. P.:348—352.
31. Enz U.//Erzeugung von Vefterschaft mit Ferriten Ti:esis, Zurich. 1955.
32. Conistock R. L., Remeika J. P.//J. Appl. Phys. 1964. Voh 35. P. 1018—1019
33. Nielsen J. W., Lepore D. A., Zneimer J., Townsend G. B.//J. Appl. Phys. 1962. Vbl. 33, Suppl. № 3. P. 1379-1380.
34. Bertaut E.//Compt rend. 1950. Vol. 230. P 213-216.
35. Prince E., Trueting R. G.//Acta crystallogr. 1956. Voh 9. P. 1025—1028.
36. Weil L., Bertaut F., 'Bochirol L.//J. Phys. rad 1950. Vol. 11. P. 208—a12.
37. Gorter E. W.//Nature.'1950. Vol. 165. P. 798—799.
38. Okamura T., Kojima Y.//Phys. Rev. 1952. Vol. 86. P. 1040—1041.
39. Weisz R. S.//Ibid. 1954. Vol. 96. P. 800—801.
40. Snoek j. L.//Philips Techn. Rev. 1946. Vol. 8. P. 353—355.
41. Okamura T., Torizuka Y.//Nature. 1951. Vol. 168. P. 872.
42. Okamura T., Fujimura T., Date M.//Phys. Rev. 1952. Vol. 85. P. 1041—1042
43. Рабкин Л. И. Высокочастотные - ферромагнетики. М. — Л.: Физматгиз. 1960.
44. Bochirol L.//Compt. rend. 1951. Vol. 233. P. 736—738.
45. Prince E.//Phys. Rev. 1956. Vol. 102. P. 674—676.
46. Pauthenet R./ZCompt. rend. 1950. Vol. 230. P. 1842—1S45.'
47. Guillaud C.//Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25. P. 64—74.
48. Tannenwald P. E.//Phys. Rev. 1955. Vol. 90. P. 463—464.
49. Torizuka Y.//Sci. Repts Inst. Tohoku Univ. 1951. Vol. A3. P. 383—384.
50. Gorliss L. M., Hasting J. M., Brockman F. C.// Phys. Rev. 1953. Voh 90. P. 1013—1018.
51. Bacon G. N., Roberts F. F.//Acta crystallogr. 1953. Vol. 6. P. 57—59.
52. Jones G. O., Roberts F. F.//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1952. Vol. 65B. P. 390—393.
53. Belson H. S., Kriessman C. J.//J. Appl Phys. 1959. Vol. 30. P. 170S—170S.
54. Rado G. T., Folen V. J., Emerson W. H.//Proc. Inst. Electron. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. 5. P 198—
55. Yager W. A., Merrit F. R., Guillaud C.//Phvs. Rev. 1951. Vol. 81. P. 477—478.
56. **ТороповВ** Н. А., Борисенко А. И.//Журиал прикл. *химии.* 1950. Т. 88. С. 1243.
57. Inoue T., lida S.//J. Phys. Japan. 1958. Vol. 13. P. 656-657.
58. Тикадзумр С. Физика ферромагнетизма: Пер. с япон./Под ред. Г. А. Смоленского и Р. В. Писарева1а. М.: Мир, 1983.
59. Arai K.-1., Tsuya N.//Ferrites: Proc. of the Intidrn. Conf. 1970. P. 51—54.
60. Hastings j M., Corliss L. M.//Rev. Mod Phvs. 1953. Vol. 25. P. 114—121.
61. Ferromagnetic materials. A handbook on the properties of magnetically ordered substances/Ed. E. P. Wohlfarth. " North — Holland Publ. Сотр. 1980. Vol. 2
62. Guillaud C., Greveaux H.//Compt rend 1950. Vol. 230. P. 1458—1461.
63. Guillaud C.//J. phys. et radium. 1951. Voh 12. P. 239.
64. Okamura T., Kojima Y., Torizuka Y.//Sci. Repts. Inst. Tohoku Univ. 1952. Vol. A4. P. 72.
65. Okamura T./'/Phys. Rev. 1952. Vol. 85. P 690.
66. Gorter E. W.//Philips Res. Reots. 1954. Vol. 9. P. 295.
67. McGuire T. R.//Phys. Rev. 1953. Vol 91. P. 206.
68. Carter A. E., Miles D. A., Welch A. j. A.//Proc. Inst. Eiectr. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. 5. P. 141
69. Gorter E. W.//Philips Res. Repts. 1954. Vol. 9. P. 403-.
70. Maria Neto J. e. a.//J. Appl. Phys. 1984. Vol 55, N" 6, pt. II B. P. 2336—2339
71. Смоленский Г. А.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1952: Т. 16. С. 728—740.
73. Enz U.//Physica. 1958. Vol. 24. P. 609
м 73. Метфесселъ Э., Мйттис Д. Магнитные полупроводники: Пер. с англа м.; Мир, 1972.
74. Магнитные • полупроводники — халькогенидные шпинели/К. П. Белов п др. М.: Изд. МГУ, 1981.
75. Нагаев Э. Л. Физика магнитных полупроводников. М.: Наука, 1979.
76. Menyuk N., Dwight K-, Arnott R. J.//J Appl Phys. 19661 Vol. 37. № 3. P. 1387—1389.
77. Остин Н., Илуэл Д. Магнитные полупроводники// Успехи фий. наук. 1972. Т. 106. С. 337—364.
78. Wojtowicz P. J.//IEEE Trans. Magn. 1969. Voh 5. P. 840.
79. Белов К. П., Королева Л. И., Гордеев И. В.//Физика низких температур. 1975. Т. 1. С. 1540—1542
80. Busch G., Magyar B.. Wachter P.//Phys. Lett. i96a Vol. 23. P. 438-440.
81. Sato K., Teranishi T.//J. Phys. Soc. Japan. 1970. Vol. 29. P. 523-524.
82. Jargen p. K., Wittekoek S. W.//Phys. Rev. Lett. 1972. VOL 29. P. 1597-1599.

83. Shepnerd I. W.//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 1835-1838.
84. Hlidek P., Polivka V. e. a.//Proc. 10-th. Congr. ICO. Prague, 1975. P. 320—325.
85. Harbeke G., Pinch H. L.//Phys. Rev. Lett- 1966. Vol. 17. P. 1090—1093.
86. Wen C. P., Hershenov B., Philipsborn H., Pinch H. L.//App(. Phys. Lett. 1968. Vol. 13. P. 188—190.
87. Haas C.//IBM J. Res. Develop. 1970. Vol. 14. P. 282—288.
88. Minematsu K., Miyatani K., Takahashi T.//J. Phys. See. Jap, 197i. Vol. 31. P. 123—129.
89. Stoyanov S. G., Iliev M. N., Stoyanova S. P.//Solld State Commun. 1976. Vol. 18. P. 1389—1392.
90. Goodenough J. B.//J. Phys. Chem. Solids. 1969. Vol. 30. P. 261-280.
91. Голик Л. Л., Григорович С. М., Кунькова З. Э. и др.//Физика твердого тела. 1975. Т. 16. С. 2151- 2153.
92. Балкарей Ю. И., Бару В. Г., Голик Л. Л.//Микроэлектроника. 1976. Т. 5. С. 475--488.
93. Moser F., Ahrenkiel R. K., Carnall E. e. a.//J. Appl. Phvs. 1971. Vol. *4-2.* P. 1449—1451.
94. Bangers P. F., Zanmarchi G.//Solid State Commun. 1968. \'ol. 6 P. 291—294.
95. Lee T. H., Coburn T., Gluck R.//Ibid. 1971. Vol. 9. P. 1821—1824.
96. Ahrenkiel R. K., Coburn T. J., Carnall E.//IEEE Trans. Magnet. 1974. Vol. MAG-10. P. 2—7.
97. Menzer G.//Z. Kristallogr. 1928. Bd. 69. S. 300—396.
98. Cibbs G. v., Smith J. V.//Amer. Mineral. 1965. Vol, 50. P. 2023—2028.
99. Prandl W.//Z. Kristallogr. 1966 Bd. 123 S. 81—116.
100. Abrahams S. ***C.,*** Geller S.//Acta crystallogr. 1958. Vol. II. P, 437.
^^^ 101 Callen E.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 519—
102. Кирюхин В. П., Соколов В. И.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 51. С. 428—432.
103. Le Craw R. C., Comstock R. L.//Physical Acoustics. Vol. III. P. B. Lattice Dynamics//Ed. W. P. Mason. N. - Y. — Lond.: Academic Press. 1965.
104. Wickersheim K. A.//Magnetism/Ed. G. Rado and H. Suhl. Academic Press. 1963.
105. Tinkham H.//J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33, SuppL P. 1248-1253. HH . h p
106. Wood D. L., Remeika J. P.//Ibid. 1967. Vol. 38. P. 1038-1045.
107. Dillon J. F. Jr.//J. Phys. et radium. 1959. Vol. 20. P. 374-377.
//J. Appl. Phys. 1958. Vol. 29. P. 539—541.
108. Кричик Г. е., Четкин М. В.//Журн. экспеоим. и теорет. физ. 1961. Т. 40. С 729—733; Т. 41. С. 673—C80.
109. Писарев Р. В., Синий И. Г., Смоленский Г. А.// Письма ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 112—114, 264—266: 1969. Т. 57. С. 737—741.
110. Dillon J. F.//J. Appl. Phys. 1969. Vol 40. P. 1230-1234.
111. Geller S.//Z. Kristallogr. 1967. Bd 125, № 1. S. 1-47.
112. Geller S., Gilleo M. A.//J. Phys. Chem Solids. 1957 Vol. 3. P. 30.
113. Euler P., Bruce J. A.//Acta Cryst. 1965. Vol. 19. P. 971-975.
114. Bonnet M., Delapalme A., Fuess H., Thomas M.// Ada crystallogr. 1975. Vol. B31. P. 2233—2240.
115. Эмиралиев А., Кочаров А. Г., Бакрадзе Р. В. и др. Кристаллография. 1976. Т. 21. С. 391—392.
116. Espinosa G. P.//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 37. P. 2344-2347.
117. Strocka B., Hoist P., Tolksdorf W.//Philips Journ. Res. 1978. Vol. 33. P. 186.
118. Tcheou F., Fuess H., Bertaut E. E.//Solid St Commun. 1970. Voi. 8. P. 1745—1758.
119 Winkler G. Magnetic Garnets. I Vieweg and Sohn: Braunschweig/Wiesbaden. 1981.
120. Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш.//Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М.: Советское радио, 1975.
121. Филиппов В. В., Шильников Ю. Р., Яковлев Ю. М., Салыганов В. И.//Материалы научно-технической информации/Синтез и исследование ферромагнитных кристаллов. М. ЦНИИ «Электроника». 1970. Вып. 9 (25). С. 34-37.
122. Яковлев Ю. М., Шильников Ю. Р., Галактионова Г. М. и др.//Ферритовые СВЧ приборы и материалы. ЦНИИ «Электроника», 1972. С. 188—193.
123. Clark A. E., Desavage B., Coleman W. e. a.// J. Appl. Phys. 1963. **V**OL 34. P. 1296—1297.
124. Петраковский Г. А., Смокотин Э. М., Титова А. Г.//Физика твердого тела. 1967. Т. 9. С. 2324^2329.
125. Смокотин Э. М., Петраковская Э. А., Саблина К. А.//Тонкие магнитные пленки, вычислительная техника и радиотехника. Красноярск, 1970. Т. 2. 127—130.
126. Mandel V. S., Smokotin E. M., Petrakovskii G. A., Lebed B. M.//Phys. Stat. SolidL 1968. Vol. 30. P. Ki1l—КП3.
127. Philips T. G., White R. L.//Phys. Rev. Letts. 1966. Vol. 16. P. 650—651
128. Яковлев Ю. М., Галактионова Г. М., Бурдин Ю. И., Петров Р. А.//Электронная техника Сер. 7. Ферритовая техника. 1968. № 4 (16). С. 26—41.
129. Яковлев Ю. М., Шильников Ю. Р., Галактионова Г. М., Салыганов В. И.//Изв. АН СССР, Сер. физ. 1971. Т. 35. С. 110—113.
130. Van der Kraan A. M., Van Loef J. J.//Proc. Conf. Tihany. 1971. Application of Mossbauer effect. Tichany. 1971. P. 519.
131 Heller P., Benedek G. B.//Phys. Rev. Lett. 1962. Vol 8. P. 428—432.
132. Eastman D. E.//J. AppL Phys. 1966. Vol. 37. P. 2312—2316
133. Bateman T. B.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2194—2195.
134. Spencer E. G., Denton R. T., Bateman T. B. e. a.// J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 3059—3060.
135. Alton W. J., Barlow A. J.//J. Appl Phys. 1967. Vol. 38. P. 3023-3024.
136. Петраковский Г. А.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. Т. 34. P. 1052—1063.
137. Spencer E. G., Denton R. T., Bateman T. B. e. a.// J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 3059—3060.
138. Alton W. J., Barlow A. J.//J. Appl Phys. 1967. Vol. 38. P. 3023—3024.
139. HaussChl S., Mateika D.//Z. Naturforsch. 1972. Bd. 27a. S. 1522—1523.
140. Graham L. J., Chang R.//J. AppL Phys. 1970. Vol. 41. P. 2247—2248.
141. Haussuhl S., Mateika D., Tolksdorf W.//Z. Naturforsh. 1976. Bd. 31a. S. 390—392.
142. Генделев С. Ш., Щербак Н. Г.//Кристаллография. 1965. Vol. 10. P. 708.
143. Hergt R., Gornert P.//Phys. Stat. Solidi(a). 1974. Vol. 21. P. 77—86.
144. Дедух Л. М., Никитенко В. И.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. Т. 34, № 6. С. 1235—1239.
145. Slack G. Д., Oliver D. W.//Phys. Rev. 1971. Vol. 4B. P. 592—609.
146. Щелкотунов В. А., Данилов В. Н. Калачева В. С.//Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1976. Vol. 12. P. 1076—1079.

147. Verweel J.//Proc. IEEE B 109, Suppl. 1962. Vol. 21. P. 95.
148. Belhe K., Verweel J.//IEEE Trans. Magn. 1969. Vol. Mag-5. P. 474.
149. Johnson B., Walton A. K.//Brit. Jourri. Appl. Phys. 1965. Vol. 16. P. 475.
150. Daral J., Ferrand B., Geynet J. e. a.//IEEE Trans. Magn. 1975. Vol. Mag-11, № 5. P. 115—117.
151. Roschmanii **P.,** Hansen **P**.//J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. P. 6257—6269.
152. Geller S. Physics of Magnetic Garnets/Ed. by A. Paoletti. Amsterdam: North-Holland. 1978. P. 1—55.
153. Tolksdorf W.//Physics of magnetic garnets/Ed. by A. Paoletti. Amsterdam. North-Holland Publ. Cотр. 1978. P. 521—539,
154. Geller S., Remeika J. **P.,** Sherwood R. C. e. a.// Phys. Rev. 1965. Vol. 137. P. 1034—1038.
155. Geller S., Williams H. J., Sherwood R. C. e. a.// Phys. Rev. 1963. Vol. 131. P. 1080—1082.
156. Hansen **P**.//Philips. Res. Rep. Suppl. 1970. № 7 P. 1—6.
157. Hansen P.//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 3638—3642.
158. Scott G. B.//Physics of Magnetic Garnets/Ed. by A. Paoletti. Amsterdam: North-Holland. Publ. Cотр. 1978. p. 445—466.
159. Галуза А. И., Еременко В. **B.,** Кириченко А. П.// Физика твердого тела 1973. Т. 15. С. 585—587.
160. Wemple S. H., Blank S. L., Seman J. A.. Biolsi W. A.//Pjys. Rev. 1974. Vol. B9, P. 2134—2144.
161. Писарев Р. В., Синий И. Г., Колпакова Н. Н., Яковлев Ю. М.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1971. Т, 60. С. 2188—2202-
162. Geller S., Williams H. J., Espinosa G. P., Sherwood R. C./ZBell Syst Techn. J. 1964. Vol. 43. P. 565-623.
163. Яковлев Ю. М., Лебедь Б. М.//Физика твердого тела. 1962. Т. 4. С. 3654—3662.
164. Jonker G. H., Wijn H. P. J., Broun P. B.//Philips Techn. Rev. 1956/57. Vol. 18. P. 145—147.
165. Braun **P.** B.//Philips Res. Repts. 1957 Vol. 12. P. 491—548.
166. Ситидзе Ю., Сато Х. Ферриты/Пер. с япои. М.: Мир, 1964.
167. Kohn J. A., Eckart D. W.//Z. Kristallogr. 1964. Bd. 119. S. 454—464.
168. Kohn J. A., Eckart D. W.//J Appl. Phvs. 1964. Vol. 35. P. 968—969.
169. Levine B. F., Nowlin C. H., Jones R. V.//Phys. Rev. 1968. Vol. 174. P. 571—582.
170. Viliers G.//Compt. rend. Acad. Sci. 1959. Vol.248. P. 1974.
171. Pauthenet R., Rimet G.//Ibid. 1959. Vol. 249. P, 565.
172. Kojima H.//Sci. Repts. Res. Inst. Tohoku Univ. 1955. Vol. A7. P. 502.
173. Tauber A., Kohn J. A., Savage R. 0.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 1265.
174. Savage R. O., Dixon S., Tauber A.//Ibid. 1965. Vol. 36. P. 873.
175. Taft D. R.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 776.
176. Okazaki T., Yutaka H.//Electronics and Communications in Japan. 1974. Vol. 57, N" 7. P. 188.
177. Dillon J. F., Kamimura H., Remeika J. P.//J. Phys. Chem. Solid. 1966. Vol. 27. P. 1531.
178. Sugawara F., lida H., Syono Ya., Akimoto S.// J. Phys. Soc. Japan. 1968. Vol. 25. P. 1553—1558.
179. Боков В. А., Мыльникова И. £., Кижаев С. А. и др.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 3695—3698.
180. Bertaut E. F., Forrat F.//J. Appl. Phys. 1958. Vol. 29. P. 247—248.
181. Cloud W. H.//Phys. Rev. 1958 Vol. 111. P. 1046—1049
182. Bozorth R. M., Walsh D. E.//J. Phys. Chem. Solid. 1958. Vol. 5. P. 299.
183. Knox K.. Geller S.//Phys. Rev. 1958. Vol. 110. P. 771—772.
184. Shafer M. W., McGuire T. R.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 984—988.
185. Shafer M. W.//Ibid. 1965. Vol. 36. P. 1145-1152.
186. Boyd E. L., Moruzzi V. L., Smart 1. S.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 3049—3054
187. Gonano R., Hunt E., Meyer H.//Phys. Rev. 1967. Vol. 156. P. 521—533
188. Litster J. D., Benedek G. B.//J. Appl. Phis. 1966. Vol. 37. P. 1320—1322.
189. Prince E.//Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 1845-1847.
190. Geller S.//Phys. Rev. 1969. Vol. 181. P. 980-985.
191. Зотов Т. Д., Сукровцева М. М.//Физика твердого тела. 1964. Т. 11. С. 649—652.
192. Andersen E. E.//Phys. Rev. 1964. Vol. 134 P. A1581—A1585.
193. Hansen P., Roschmann P., Tolksdorf W.//J Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 2728.
194. Plant J. S.//J. Phys. C.: Solid State Phys. 1983. Vol. 16. P. 7037—7051.

Глава 30

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Н. А. Бабушкина

30.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Гальваномагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, по которому протекает электрический ток.

Термомагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, внутри которых имеется тепловой поток.

Наиболее характерные черты этих явлений связаны с воздействием индукции магнитного поля B на траектории движения носителей тока, которые искривляются из-за силы Лоренца и представляют собой спирали с образующей вдоль B. Если потоки теплоты и заряда распространяются вдоль B, то возникают продольные гальвано- и термомагнитные эффекты (ГМЭ и ТМЭ). Магнитное поле не меняет продольную составляющую импульса электрона, поэтому влияние его в этом случае невелико и продольные ГМЭ и ТМЭ для всех металлов невелики и заключаются соответственно в небольшом (порядка 1) увеличении электро- и теплосопротивления.

Если потоки теплоты и зарядов направлены перпендикулярно B (qJLB, jJ_B), то возникают поперечные ГМЭ и ТМЭ. При этом, вообще говоря, направления электрического поля E и градиента температуры VT не совпадают с заданными направлениями векторов плотности тока j и потока тепла q (для определенности будем счи-

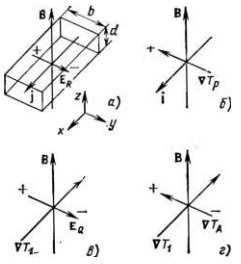


Рис. 30.1. Схемы ориентации векторов B, j, E, \ *T:*
г-для эффекта Холла; б — для эффекта Эттингсгаузена;
г-для эффекта Нернста; г —. эффекта Риги — Ледюка

тать ПОТОКИ j И q направленными вдоль оси ***x,*** а магнитное поле — вдоль оси г, рис. 30.1).

В общем случае связь между величинами j, E, у и Ц тензорная:

$$j \qquad E = \rho \cdot VT; \quad q = - \qquad VT,$$

где а, S, X, 11 — тензоры соответственно электропроводности, т е р м ^ Д ^ теплопроводности, термоэлектрического тока (П| = (т5),

Если jJ,B, то:

1) в направлении, перпендикулярном к j и B, возникает электрическое поле ***(эффект Холла) ER=RjB,*** где ***R*** — коэффициент Холла (рис. 30.1, ***а);***

2) в направлении j изменяется электрическое сопротивление р. При этом $\rho_{xx} = E_j / j_x$ называют ***магнитосопротивлением*** (МС);

3) в направлении, перпендикулярном к j и B, возникает температурный градиент ***(эффект Эттингсгаузена)VTp=PjB,*** где ***P*** — коэффициент Эттингсгаузена (рис. 30.1, ***б).***

Если q± B, то:

1) в направлении, перпендикулярном первичному градиенту температур и B, возникает электрическое поле ***(эффект Нернста) Eq==QB\VT^,*** где ***Q — коэффициент Нернста*** (рис. 30.1, в);

2) в направлении, перпендикулярном первичному градиенту температур уГ, и B, возникает градиент температур ***(эффект Риги — Ледюка) \iTa = ABs/Tu*** где ***A*** — коэффициент Риги — Ледюка (см. рис. 30.1, г);

3) в направлении первичного теплового потока изменяется теплопроводность.

Поведение ГМЭ и ТМЭ существенно различается (качественно и количественно) в областях слабого и сильного магнитных полей. Граница между этими областями определяется безразмерной величиной (от, где ***a-eB/(m*c)*** — циклотронная частота вращения электрона с эффективной массой ***m*; x*** — время между актами рассеяния.

В слабых магнитных полях (от^1 для всех металлов $\rho \cos^2$ и $\Delta\rho/\rho \ll 1$, где $\Delta\rho = \rho(B) - \rho(0)$, $\rho = \rho(0)$; i?=1/(ne), где ***n*** — концентрация носителей тока; ***e*** — заряд носителей тока, равный e=—1,6-10-® Кл.

Условие (от> 1 определяет область сильных магнитных полей, где асимптотики ГМЭ и ТМЭ определяются топологией поверхности Фермы (ПФ) и существенно различаются как для различных металлов, так и для различных ориентаций монокристаллов одного и того же металла.

ПФ — поверхность в импульсном пространстве, разграничивающая при 7=0 заполненные и свободные электронные состояния.

Условие ыт> 1 выполняется обычно при низких температурах (7'~4 К) в чистых образцах (R (300 К)/ 7?(4,2 К)~10^).

Связь топологии поверхности Ферми и гальваномагнитных эффектов. В случае ыт>1 траектория движения электрона в магнитном поле описывается уравнениями e=const (e—энергия) и pz=coust (pr — проекция импульса на направление магнитного поля), что соответствует линии сечения ПФ в импульсном пространстве (пространстве скоростей) плоскостью, перпендикулярной магнитному полю. Если ПФ замкнутая, то все траектории в реальном пространстве — замкнутые орбиты, подобные сечению ПФ в импульсном пространстве и повернутые на л/2. Если ПФ — многосвязная бесконечная поверхность, то кроме замкнутых сечений имеются открытые траектории, которым в реальном пространстве соответствует движение электрона в направлении, повернутом на угол л/2 относительно направления открытости в пространстве скоростей.

Если ПФ замкнутая и (от>1, то в электрическом иоле ***E*** все электроны дрейфуют со скоростью УД= $\frac{E \times B}{c B^2}$, что приводит к появлению недиссипативного тока и определяет эффект Холла и недиагональную компоненту тензора проводимости $\sigma_{xy} = neiB_{ssa}J(\varepsilon n(>o$ B"Чао=пе'т/т — проводимость без магнитного поля). В направлении электрического поля перенос заряда осуществляется посредством диффузии центров орбит, т. е. пересекоков электронов при рассеянии на соседнюю орбиту. Это приводит к появлению диссипативного тока и определяет соответствующую диагональную компоненту тензора проводимости $\sigma_{xx} S^2 Co^2$ (ыг)^ B^. Электроны па незамкнутых (открытых) орбитах в дрейфовом токе не участвуют. Для них проводимость в направлении открытости такая же, как и без магнитного поля, т, е, в данном случае $\sigma_{xx} — \sigma_o$.

При наличии перекрытия двух последовательных энергетических зон, из которых нижняя была бы полностью заполнена, происходит перетекание электронов из одной зоны в другую. При этом концентрация пустых (дырочных) состояний «2 в одной из зон совпадает с концентрацией заполненных (электронных) состоянии щ в другой зоне. Такой металл принято называть компенсированным («i=«2)- Дрейфовый ток в нем в первом приближении отсутствует. В случае замкнутых ПФ можно с определенностью говорить либо об электронном ее характере, если внутри находятся заполненные состояния, либо о дырочном, если она окружает пустые состояния. В этом случае, если П1 = П2, все компоненты тензора проводимости определяются диффузией центров орбит, т. е. 0;tx~OB4,soo/({OT)2coB2 (На незамкнутой, а также многосвязной ПФ возможны как дырочные, так и электронные орбиты.) Приведенные выражения для компонент тензора проводимости исчерпывающим образом описывают все многообразие возможных асимптотик поведения гальваномагнитных свойств металлов.

В эксперименте определяют МС, т. е, $\rho_M = \frac{Ex}{\quad}$ = — =— , и холловское сопротивление, ТГ Е.

= RB, где /? — коэффициент Холла, который, однако, ие для всех металлов

ляется константой. При этом количественно МС определяется величиной ыт (а не собственно индукцией магнитного поля В), этим обусловлено так называемое эмкирическое ***правило Колера,*** согласно которому МС определяется магнитным полем $m \wedge f l A \wedge]]$

На рис. 30.3—30.22 приведены основные топологические типы ПФ, а в табл. 30.2 — данные о топологии ПФ металлов и ряда сплавов:

1. Для однозонных металлов с замкнутой ПФ (щелочные металлы) — const tjo"^' — МС не зависит от в, и принято говорить о ***насыщении*** МС, а = — В, т. е. коэффициент Холла ***R=--l(ne).*** В этом случае значение коэффициента Холла оказывается таким же, как и для области слабых магнитных полей WTV^**I**.

2. Для однозонных металлов с открытой ПФ (благородные МЄП В тех ориентациях В оттые траекторию осей кристалла, в которых открыто току) Е пикают вдоль оси ***у*** (перпендикулярно пространстве, т. е. когда cr,i,~Oo. В осТі направлениях р^^ насыщается. На диаграмме враи! (изменение МС в зависимости от ориентации Ь сительно осей кристалла) МС почти везде невелико и имеют место острые максимумы, соответствующие открытым траекториям

3. Для компенсированных металлов (П| = П2) с замкнутыми ПФ (бериллий, молибден, вольфрам, полуметаллы) рдл ~огр'(а)т)-с\эб2 ДЈJ, всех направлений Небольшая анизотропия, не зависящая от **В,** обусловлена несферпчностью ПФ. Эффект Холла (н соответственно «коэффициент Холла») — сложная функция ***В, Т и*** ориентации кристалла.

4. Для компенсированных металлов с открытой ПФ (магний, цинк, кадмий, олово, свинец и др.) р^jt'^Oo'' т. е. не зависит от ***В*** (насыщается) в тех ориентациях **В,** когда открытые траектории возникают вдоль оси ***х*** (параллельно току) в реальном пространстве, т. е. когда ***Oxx — Go.*** В остальных направлениях р^jtCoBj. На диаграмме вращения МС почти везде велико и имеют место острые минимумы, соответствующие открытым траекториям.

5. Для многозонных некомпенсированных металлов {ni^ni) с замкнутыми и открытыми ПФ (индий, алюминий, галлий, таллий) асимптотики рхх такие же. как и в п. 1 и 2, а рд(,= — ***В,*** где /г=п,—«2. за исключением ***пе*** отдельных осиентаций, когда следует учитывать геометрическую раскомпенсацию на многосвязных ПФ.

Во многих многозоиных металлах в сильном магнитьом поле становится возможным переход электронов на ПФ из одной зоны проводимости в соседнюю — так называемый магнитный пробой. Это приводит к новым траекториям и, таким образом, существенно влияет на гальваномагнитные эффекты.

Наиболее подробно топология поверхности Ферми рассмотрена в |1—3].

Основные теоретические и экспериментальные представления о магнитосопротивлгнии металлов имеются в [4-6]. В табл. 30.3, 30.4 и на рис. 30.24—30.53 приведены основные данные о Мс металлов. Следует заметить, что при температуре 20°С и обычно используемых значениях магнитной индукции Тл (озт.^) Др/р для большинсгоа металлов весьма мало Например, для мели Др/ргаЮ-" при 6=2 Тл. Исключением является висмут, для которого Др7р»2 при В=3 Тл.

Эффект Хол.!а. Основные теоретические и экспериментальные данные об эффекте Холла представлены в Щ. Коэффициент Холла R в металлах может быть положительным и отрицательным и даже менять знак с изменением температуры. В области высоких и промежуточных температур для большинства металлов он практически не зависит от температуры. Основные данные об эффекте Холла в металлах приведены в табл. 30.5 и на рис. 30.54—30.69.

В ферромагнетиках иа электроны проводимости воздействует магнитное поле, отличное от внешнего. При этом наблюдается особый, ферромагнитный эффект Холла. Для ферромагнетиков экспериментально найдено, что поле Холла

(30.1)

где Н — напряженность магнитного поля; Цо — магнитная постоянная; ***М*** — намагниченность образца; / — плотность тока, протекающего через образец: Ro и Ri— обыкновенный и необыкновенный (аномальный) коэффициенты Холла.

Последнее соотношение с учетом равенства можно записать в виде

$$dll = R\wedge B - f - Rs \qquad (30.2)$$

где ***ё*** — нормированное на полный ток ***I*** и толщину образца ***d*** измеряемое в эксперименте напряжение Холла ***Uf,; Rs = R\—Ro*** — так называемый спонтанным и.м ферромагнитный коэффициент Холла. Для большинства ферромагнитных металлов Rs^Ri.

Из этого выражения определяют коэффициенты Холла, используя экспериментальные зависимости ***S {B)*** (рис. 30.2).

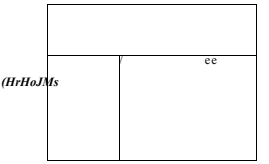


Рис. 30.2. Зависимость ЭДС Холла g от магнитной индукции для ферромагнитной пластинки. Определение обыкновенного /?о и аномального Ri коэффициентов Хол-

Обычно Rs^Ro и сильно зависит от температуры. С повышением температуры спонтанный коэффициент Холла ***Rs*** возрастает, достигая максимума в точке Кюри, а затем падает. В парамагнитной области температур эффект Холла определяется соотношением

$$S = R*H,$$

где ***R* = Ro+xRs='Ro+Rp,*** X — магнитная восприимчивость вещества; ***RP*** — парамагнитный коэффициент Холла — Киониа.

Значения гальваномагнитных коэффициентов ферромагнитных металлов приведены в табл. 30.7.

Термомагнигные эффекты в ферромагнетиках определяются по формулам:

эффект Эттингсгаузена

$$\partial Tp \quad /\partial y \quad = \quad \{P, \quad 8+PMч)!'$$

эффект Риги — Ледюка

$$\partial Tл \ /\partial y = \{A,B + \qquad \partial T \wedge /\partial x\text{-}.$$

эффект Нериста

$$dU_Q \qquad /dy=(Q,B+Q,Mix,)l.$$

Таблица 30.1. Таблица перевода коэффициентов гальвано- и термомагнитных явлений из СИ в практическую систему

Величина	Обозначение	Система СИ	Практическая система (внесистемные единицы)
Магнитная индукция	*B*	Вб / м^ ~ В-с / м^	10-2 • В-см / А-Гс
Коэффициент Холла	*R*	мЗ / К ~ м^ / А-С	
Коэффициент Этингсгаузена	*P*	К • мЗ / В - А • с	10-2 К-см / А-Гс
Коэффициент Риги—Ледюка	*A*	м^ / В • с	10-^ Гс->
Коэффициент Нериста	*Q*	М2 / К • с	

в ферромагнитных металлах зависимость ***р*** от напряженности магнитного поля также имеет ряд особенностей, которые обусловлены наличием в этих веществах самопроизвольной намагниченности. В больших магнитных полях (когда происходит техническое насыщение материала) сопротивление с ростом напряженности поля всегда уменьшается независимо от направления магнитного поля по отношению к току.

В таблицах и рисунках этой гл'авы принято обозначение RRR = p(300 К)/p(4,2 К). Этот параметр определяет чистоту образца.

Значения всех гальвано- и термомагнитных коэффициентов даны в СИ. Для перевода в другие системы единиц следует пользоваться табл. 30 1. Следует иметь в виду, что напряженность внешнего магнитного поля равная в системе СГС 10 кЭ, соответствует индукции внешнего магнитного поля в системе СИ, В = [ХоЯ=1 Тл где [Хо=4я-10-^ Гн/м = 1,256-10-5 Гн/м — магнитная постоянная.

30.2. ТОПОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ФЕРМИ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.2 и на рис. 30.3—30.23 приведены сведения о топологии поверхности Ферми для различных металлов [1].

30.2. Топология поверхности Ферми металлов *[1]*

	Кристаллическая решетка	кий тип и другие сведения о поверхности Ферми
	ГЦК	rti=7^=rt2; fiCS,O Тл, закрытая; В > 3 , 0 Тл, магнитный пробой, рис. 30.7
Бериллий	ГПУ	«1 = «2; в < 5 , 0 Тл, закрытая; В > 5 , 0 Т л , магнитный пробой в базисной плоскости, рис. 30.4
Ванадий	ОЦК	пгфп^, рис. 30.17
Висмут	Ромбоэдрическая	П1 = П2, закрытая; рис. 30.23
Вольфрам	ОЦК	1l1 = п^, закрытая; рис. 30.18
Гадолиний	ГПУ	
Галлий	Объемноцентрическая орторомбическая	П1 = П2, открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси ***с,*** рис. 30.9
Графит		Закрытая — самопересечение,
Железо	ОЦК	tti^n^, открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров по осям [001]
	ГЦК	« 1 = 1 электрон/атом, «2 = 0, открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров по осям [111] (основное открытое направление) и осям [110] и [100] (вторичные открытые направления), рис. 30.13
Индий	Тетрагональная	= Пг, закрытая
Иттербий	ГЦК	Закрытая
Иттрий	ГПУ	Открытая (расчет)
Кадмий	ГПУ	П1 = щ, открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси [0001], рис. 30.14
Калий	ОЦК	«1 = 1 электрон/атом, = закрытая (сфера), рис. 30.3
Кальций	ГЦК	Открытая (расчет), рис. 30.6; подобна поверхности Ферми свинца (рис. 30.11)
Кобальт	ГЦК	Рис. 30.20
Литий	ОЦК	щфп^, зактытая (сфера)
Магний	ГПУ	П1 = П2, открытая, 5 > 0 , 5 Тл, магнитный пробой в плоскости [0001;], рис. 30.5
Медь	ГЦК	« 1 = 1 электрон/атом, «2 = 0; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111]; подобна поверхности Ферми золота, рис. 30.13
Молибден	ОЦК	«1 = Пг, закрытая, рис. 30.18
Мышьяк	Ромбоэдрическая	П1 = Я2; закрытая, рис. 30.12

Продолжение табл. 28.1

Кристаллическая решетка	Топологический	I поверхности Ферми
ОЦК **гцк**	« l = 1 электрон/атом, «2 = 0; закрытая — сфера (см. калий) = «2; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111]; подобна поверхности Ферми золота
ОЦК	Щфтц; магнитный пробои, открытая — сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [0011, [ПО] и [111], рис. 30.17
Тетрагональная	= Щ' открытая — плоская сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [0101 и 1110], рис. 30.10 B > 5 , 0 Тл, магнитный пробой
ГПУ	«1 = «2^ открытая — плоская сетка гофрированных цилиндров, параллельных плоскости [0001] и оси [0001], магнитный пробой
ГЦК	«l =: щ; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001], рис 30.22
ГЦК	«1 = Щ' открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001]; подобна поверхности Ферми палладия
ГПУ	«1 = «2; открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси [0001]; B > 3 , 0 Тл, магнитный пробой; появляются дополнительные открытые направления вдоль осей [0001] и [1010], рис. 30.19
ГЦК Рьмбоэдрическая	Закрытая (расчет), рис. 30.21 «J = «2; открытая—открытые направления параллельны осям [100] и [011], рис. 30.16
ОЦК ГПУ	« l = 1 электрон/атом, «2 = 0; закрытая сфера (см. калий) Открытая, магнитный пробой
ГЦК	= открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111], рис. 30.11
ГЦК	и, = 1 электрон/атом, п^ = 0; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111]; подобна поверхности Ферми золота
Полиморфная ГЦК, ГПУ Полиморфная Ромбоэдрическая	п^фп^, закрытая Открытая (расчет) «i=W2, закрытая
	открытая; две гофрированные плоскости [0001], с узкими перемычками вдоль оси [0001]; рис. !> 3 , 0 Тл; магнитный пробой
ОЦК	«1 = «2, открытая — пространстгенная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001]; подобна поверхности Ферми ниобия
ГПУ Полиморфная	« l = «2.
ОЦК	« l = «2, закрытая (см. рис. 30.18); в антиферромагнитном хроме B > 6 , 0 Тл, магнитный пробой вдоль [100]
ОЦК	«1 = 1 электрон/атом, «2 = 0; закрытая — сфера (см. калий)
ГПУ	«1 = «2, открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси [0001]; рис. 30.15, B > 0 , 2 5 Т л ; магнитьш пробой, проявляются открытые направления вдоль осей [1210] и [1010]
ГПУ	Открытая (расчет)
AuSn AuAla AgZn, CuZn, Pdin AuGa^, Aulna MgZng	Гексагональная ГЦК Р-латунь ГЦК Гексагональная	Открытая Открытая, аналогична по топологии поверхности Ферми золота Открытые (расчет) Открытые, аналогичны по топологии поверхности Ферми золота

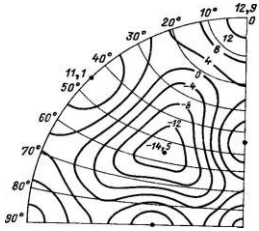
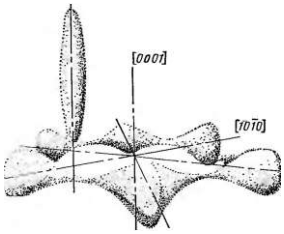


Рис. 30.3. Поверхность Ферми для К [2]. Проведены кои-

м Г металлов"^ L4ecTBeHHo Та-



Йа»)°[2] Д^я Be («сигара» и «ко.

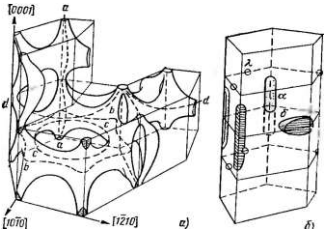


Рис. 30.5. Поверхность Ферми для Mg:
й-многосвязная дырочная поверхность
е-электронная поверкность в третьей и четвертой

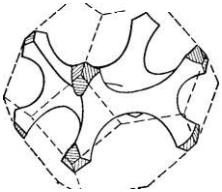


Рис. 30.6. Многосвязная дырочная поверхность Ферми для Са в первой зоне (Модель Харрисона) [2]

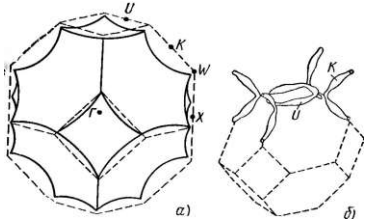


Рис. 30.7. Дырочная поверхность Ферми для A1 кп ^тп рой зоне [3 (с) и электронная поверхность Ферми для A1 в третьей зоне (модель Ашкрофта) [2] (б) ^

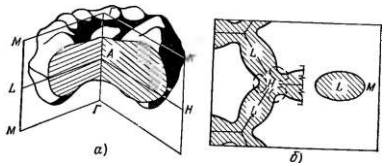
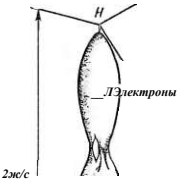


Рис. 30.8. Поверхность Ферми в третьей зоне для Т1 Г9]



Дырки.

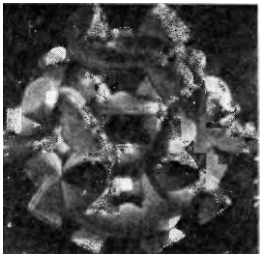


Рис. 30.11. Открытая электронная поверхность Ферми для РЬ (третья зона) [1]

J Электроны

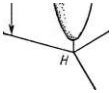


Рис. 30.9. Поверхность Ферми для графита (Модель Макклура) [2]

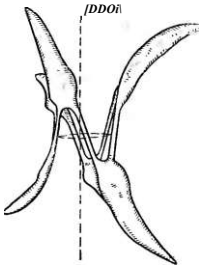


Рис. 30.12. Дырочная по-в^хность Ферми для As

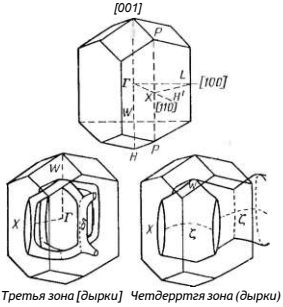


Рис. 30.10. Зона Брюллюэна и дырочные открытые поверхности Ферми для Sn [1]

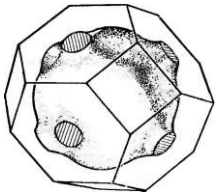


Рис. 30.13. Поверхность Ферми для Си, Ли и Ag [6]

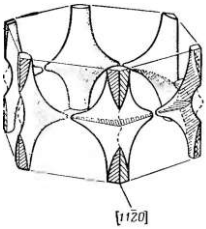


Рис. 30.14 Открытая поверхность Ферми для, Cd [1]

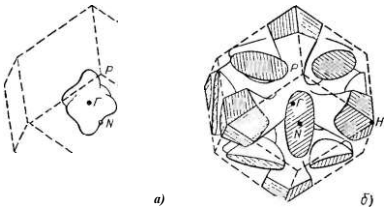


Рис. 30.17. Поверхность Ферми для металлов V группы (V, Nb и Та) (модель Маттхейса) [2]

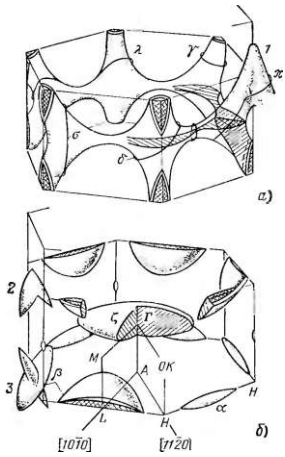


Рис. 30.15. Поверхности Ферми для Zn [1]:
й — открытая дырочная гювепхность (вторая зона) (карманы п первой зоне выделены поперечной штриховкой); б — электронная поверхность в третьей и четвертой зонах (сигары в четвертой зоне поперечно заштрихованы)

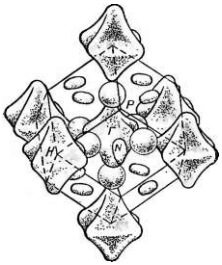


Рис. 30.18. Поверхность Ферми для металлов Mo, W парамагнитного Cr [2] (модель Ломера)

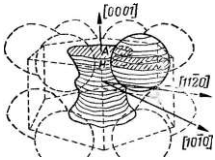
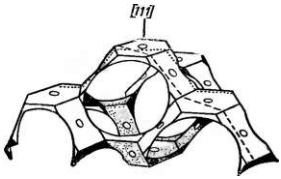


Рис. 30.19. Поверхность ферми Re; дырочная повер.х-ность в седьмой зоне (замкнутая, пунктир) и открытая электронная в восьмой зоне [2]



Рис, 30.16. Открытая многосвязная дырочная повер.х-ность Ферми для Hg в первой зоне [1]

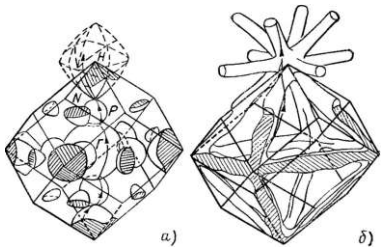


Рис. 30.20. Поверхность Ферми для Co (теоретическая модель) [2]:
41—дырочная поверхность со спином «вниз»; б — дырочная по-

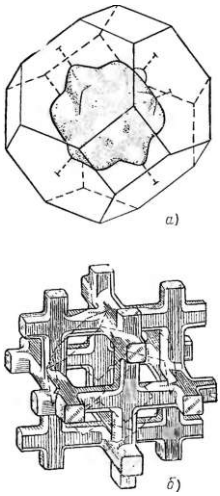


Рис. 30.22. Поверхность Ферми для Pd [2]j
а — электронная поверхность в Г; б — многосвязанние ДЬ|рОЧЬ ные трубки

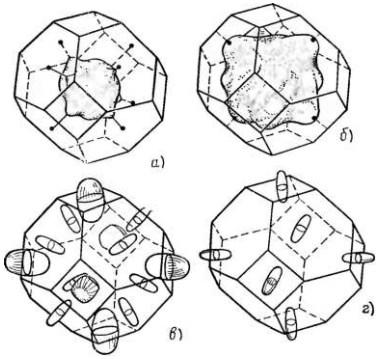


Рис. 30.21. Модель поверхности Ферми для Rh [2]:
с и б — электронные поверхности; в и г — дырочные карманы

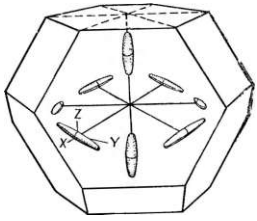


Рис. 30.23. Поверхность Ферми длля Bi [3]

30.3. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.3, 30.4 и на рис. 30.24—30.53 приведены данные, характеризующие влияние магнитного поля на электрическое сопротивление различных металлов.

Таблица 30.3. Изменение электрического сопротивления чистых металлов в магнитном поле

Др/?^, если В **I,** Ар/р , если **ВЦ I.** В таблице представлены значения Ар/р , кроме специально отмеченных случаев

Материал, чистота	RRR	*т, к*	*в,* Тл	Др/р	
				Др/рх	Др/р ⫴
Алюминий (99,999 %)	15 000	19,6	4,0	5,0	2,2
	15 000	4,0	4,0	2,4	1,5
	28 200	19,6	2,0	3,1	
	4000	4,2-70	3,8	См. рис. 30.25	
Барий	140	20,4	3,32	0,41	
	140	14,0	3,32	1,08	
Бериллий поликристаллический	30	291	30,4	0,66	
	30	78	30,4	2,28	
Бериллий монокристаллический	40-90	4,2	3-7,0	См. рис. 30.26	
Висмут поликристаллический	–	291	30,0	37	
	–	80	30,0	1360	
Висмут монокристаллический	–	14; 4,2		См. рис. 30.27	
Вольфрам		78	30,0	0,938	
Вольфрам монокристаллический	13-500	4,2		См. рис. 30.28	
Галлий поликристаллический 99,7 %		195	30,0	0,173	
Галлий монокристаллический 99,999%	25-103	4,2	2,0	24-104	*l l 'a* l В ▮ с
				6-10«	1 В || Ь В ▮ с
Графит монокристаллический 99,995%		1,2	16,0		*к* 1-103
	–	4,2	10,0		9,5-103
	–	4,2	2,0		1,5-103
Европий монокристаллический 99,9%	–	4,2	2,0		0,16
	–	4,2	4,0		0,33
	–	4,2	8,0		0,58
Золото поликристаллическое 99,999 %	–	79	4,0		0,018
Золото монокристаллическое 99,999 %	1600	4,2	3,0	См. рис. 30.29	
Индий поликристаллический	Z	165	30,0		0,03
		80	30,0		0,14
Индий монокристаллический	12 000	4,2	3,5	См. рис. 30.30	
Кадмий поликристаллический	–	291	30,0		0,08
	–	78	30,0		0,927
				Др/р^	Др/р|1
То же	200	4,2	1,6	26	0,05
Кадмий монокристаллический	1000	4,2	1,6	100	10
Калий монокристаллический 99,95%	3400	4,2	5,5	0,38 при ВЦ [100]	
	3400	4,2	5,5	0,22 при ВЦ [ПО]	
Литий	985	4,2	0,829	0,978	
»	985	77	1,43	0,155	—
»	985	4,2	1,60		0,975
»	985	77	1,49	–	0,07
			См. рис	30.31	
Магний поликристаллический	—	291	30,0	0,167	
То же	–	78	30,0	2,82	
Магний монокристаллический	230-610	4,2	2,5	См. рис. 30.32	
Медь поликристаллическая	-	78	30,0	0,429	
Медь монокристаллическая	480-630	4,2-70	3,8	См. рис. 30.25	

	RRR	*m.* к	*в,* Тл			
Молибден поликристаллический		195	30,0		0,095	
То же		78	30,0		0,915	
Молибден монокристал.	1000	4,2	2,5	См. рис. 30.33		
Натрий поликристаллич	–	80	30,0		0,07	
То же	5000	4,2	0,9		0,399	
				Др/р_	Ар/р| |	
Неодим 99,9%	—	1,4	0,5	0,04	-0,13	127
То же		4,2	0,5	0,02	-0,05	[27
		14,0	0,5	-0,015	-0,04	127
		20,4	0,5	0,010	-0,02	127
Неодин 99,8%	—	4,2	8,0	См. рис. 30.34		117]
Олово поликристаллическое	—	291	30,0		Cl,02	111]
		80	30,0		0,23	[11]
« монокристаллическое	10 000	4,2	2,0	См. рис. 30.35		128]
				Др/р		
Осмий монокристаллический, ось образца вдоль [1120]		4,2	8,0	18	185	
То же	—	4,2	*i,0*	16	170	
	–	4,2	8,0	4	100	
		4,2	8,0	2,7	80	
Палладий поликристаллическпй		*78*	30,0		0,102	
Палладий монокристаллический	1730	4,2	1,0	См. рис. 30.36		
Платина	—	78	30,0		0,102	
	2400	4,2	2,0	См. рис. 30.37		
Празеодим	—	4,2	8,0	Др/Р,1= 0,04		
Рений 99,6%	—	80	3,43		0,0196	
Рений монокристаллический	1600	4,2	3,43	См. рис. 30.38		
Родий псликристаллический		20,4	3,6		1,546	
То же		4,2	3,7		1,867	
Рубидий	300	4,2	2,55	0,36	0,117	
Рутений монокристаллический	100	4,2	4,0	0,87	I II [1000] [1120]	
	100	4,2	4,0	**0.75**	**при{'111Д|**	
	100	4,2	4,0	**0.59**	при{ИИП20|	
	100	4,2	4,0	0,53	***ппи i ' ИИ201*** **(в II [1000]**	
Самарий 99,9%	—	4,2	0,5		- 2	
То же		4,2	4,0		5	
		4,2	6,0		12	
	—	4,2	8,0		17	
Свинец поликристаллический 99,999'	—	291	30,0		<0,01	
То же		80	30,0		0,05	
	17 000	4,2	2,28		417	
	17 000	1,86	2,28		4810	
Свинец монокристаллический	10 000	4,2	2,4	См. рис. 30.		
Серебро поликристаллическое	–	78	30,0		0,376	
То же	ШОО	4,2	2,4	См. рис. 30.		
Сурьма поликристаллическая	—	291	30,0		3,5	
То же	_	80	30,0		40,0	

Продолжение табл. 30.3

Л!атериал, чистота			
Таллий поликристаллический		30,0	0,159
То же	4,2	13,0	См. рис. 30.41
Тантал поликристаллический	291	30,0	0,001
То же		30,0	0,01
Хром поликристаллическии	291	30,0	0,03
Го же	78	30,0	
Цезий поликристаллический	20,4	4,0	0,03
Цинк поликристаллический	29]	30,0	0,06
	78	30,0	0,927
Цинк монокристаллический 99,9	4,2	1,8	См. рис. 30.^
Цирконий поликристаллический	195	30,0	0,01
То же		30,0	0,05

* <f – угол между направолением В 1 [1120].

Таблица 30.4. Изменение электросопротивления ферромагнитных металлов в магнитном поле

.Материал, чистота			
Гадолиний поликристаллический Е	4,2-350	1,6	См. рис. 30.43
Гадолиний монокристаллический	205		0,015 при { f j ^
			-0,01 при
			См. рис. 30.44
Гольмий поликристаллический 99,9 %	4-130	2,0	См. рис. 30.45
Диспрозий поликристаллический 99,5 %	93	0,8	—0,02 Ш 6, В П а
	60-ISO	1,5	См. рис. 30.46
			AP/P,
Железо монокристаллиеекое, вискер	300	0,1	9 • 10-^ (^SIISI
То же	300	0,1	0,36.10-2 —3.10- IIIIII] ill [lll]
			См. рис. 30.47, 30.48
Кобальт монокристаллический, вискер	4,2	15	См. рис. 30.49
Кобальт поликристаллический 99,25 %	200—600 'С	0,2	См. рис. 30.50
			18 • 10-^
			^P/P| Ap/p,
Никель	300	1,6	15-10-' -15-10-3
Никель поликрпсталлический	300	0–1, 8	См. рис. 30.51
Никель монокристаллический	300-660	1,0	См. рис. 30.52
			Др/р, Др/рх
Тербий поликристаллический *К5%*	220	1,5	—0,02 —0,018
То же	0-240	1,4	См. рис. 30.53

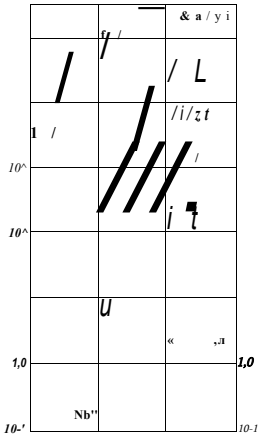


Рис. 30.24. Приведенная диаграмма Колера: зависимость Ар/р от В-р (300 К)/р .(4,2 К) для ряда металлов [5]

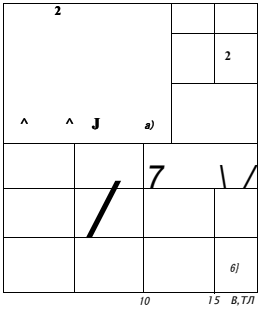


Рис. 30.26. Анизотропия Ар/р для гексагонального образца Be [12] (а) (RRR = 88; Г - 4,2 К; В = 7,0 Тл; <р — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец) и зависимость Др/р для Be от магнитной индукции (б) в направления.х минимума (1), максимума (2) угловой диаграммы (а) (см. п. 3, с. 738)

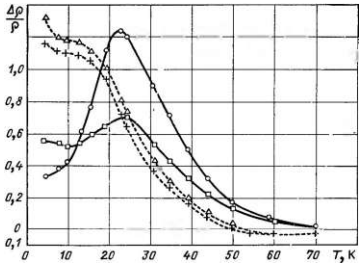


Рис. 30.25. Температурная зависимость Ар/р для поликристаллически.х образцов А1 и Си в магнитном поле В = 3,8 Тл [9]:
для А1: 0 - R R R = 4000; • - RRR = 1875: для Си: А - R R R = 480; + _RRR=480

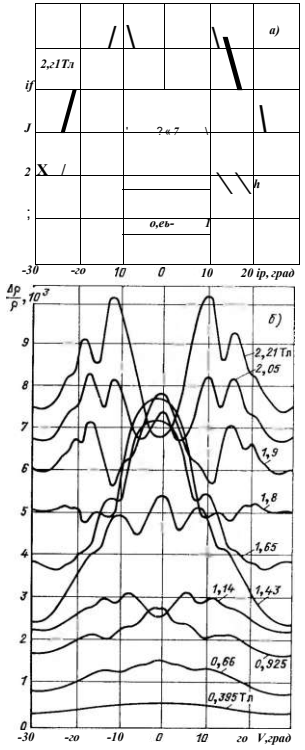


Рис. 30.27. Зависимость Ар/р для монокристалла Bi от ориентации магнитного поля относительно бинарной оси при температуре 14 К (а) и 4,22 К (б) [13] (главная ось параллельна направлению тока)

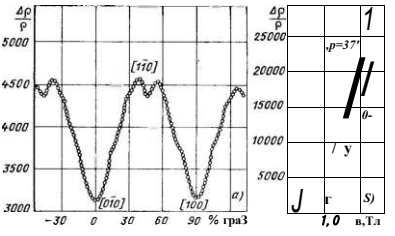


Рис. 30.28. Анизотропия Ар/р монокристалла W [14] (RRR=13 000; 7=4,2 К; В=0,9 Тл; плоскость вращения магнитного поля перпендикулярна к оси [001]; угол ф, определяющий направление поля в этой плоскости, отсчитывается от оси [010]) *(а)* и зависимость Ар/р для W от магнитной индукции (б) в направлениях, соответствующих максимуму (ф=37°) и минимуму (ф=0°) угловой диаграммы на рис. а (см. п. 3, с. 738)

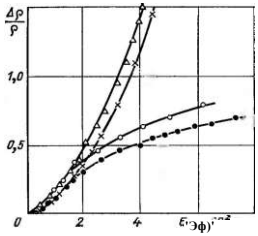
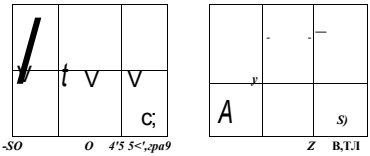


Рис. 30.29. Зависимость Ар/р для монокристалла Ли от эффективной магнитной индукции ***Вэф = В-р*** (300 К)/ /р (4,2 К) [19] (RRR=16 000):

ф —в минимуме (Ф=0°); Х —в максимуме (ч)= —75°) угловой диаграммы при *Т* = 1,2 К; О — в минимуме (ч)=0°) и Д —в максимуме (ч)= —75°) при Г=20,4 К; Ф — угол поворота магнтыого поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец (диаграмма вращения подобна диаграмме вращения Ag, см. рис. 30.40) (см п. 2, с. 738)

Рис. 30.30. Анизотропия Ар/р для монокристаллов In (й, [20]) (RRR = 12 400; ***Т = 4,2*** К; В = 2,46 Тл; ф — угол между магнитным полем и направлением в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец) и зависимости Ар/р для In от магнитной индукции (б) в направлениях минимума и максимума угловой диаграммы а (см. п, 1, с. 738)



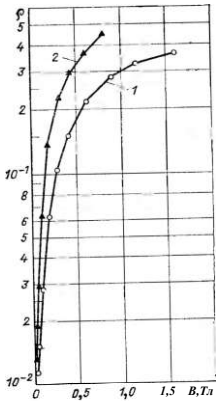


Рис. 30.31. Зависимость электросопротивления р поликристаллического образца Li от магнитной индукции ири Г = 4,2 К [23]:

I — в параллельна электрическому току через образец; г — В перевендикуляриа электрическому току через образец

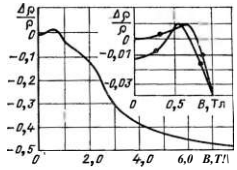


Рис. 30.34. Зависимость Др/р || для Nd от магнитной индукции ири 7"=4,2 К [17]

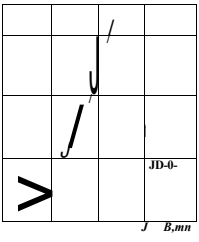
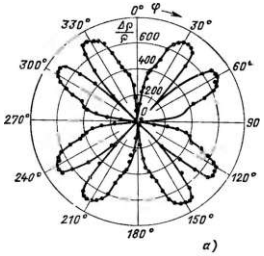
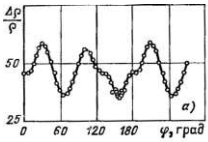


Рис. 30.32. Зависимости Др/р для монокристалла Mg от магнитной индукции для направлений максимума (ф=90°) и минимума (Ф=0°) угловой диаграммы (при ***Т***— = 4,2 К) [24!; ф - угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец; ось образца составляет 65° с осью [0001] {см. п. 4, с. 738)





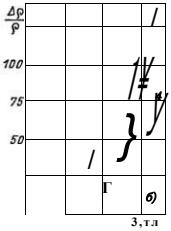


Рис. 30 33 Анизотропия Др/р для л1онокристал.7]а Мо (о) [251 (RRR=iOOO; Г=4,2 К; 6= =2,3 Тл; ф — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электричес кому току через образец. Ориентация кристалла 0 = 34°. £= : О и I — полярный и азимутальные углы осей образна относительно главных осей кристалла) и зависимость Ар/р для Мо от магнитной индукции (б) в направлениях минимума и максимума угловой диаграммы а (см. п. 3, с. 733)

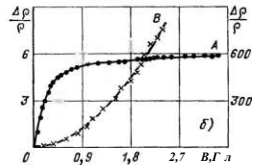


Рис. 30.35. Полярная диаграмма Др/р для монокристалла Sn (а) [28] (Г=4,2 К; 6=2,3 Тл; ф—угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец, 11.В, !|| [001]) и зависимость Др/р для Sn от магнитной индукции *(б)* в направлениях минимума (ф=0°) и максимума {ф=30°) полярной диаграммы *а* (см. п. 4, с. 738)

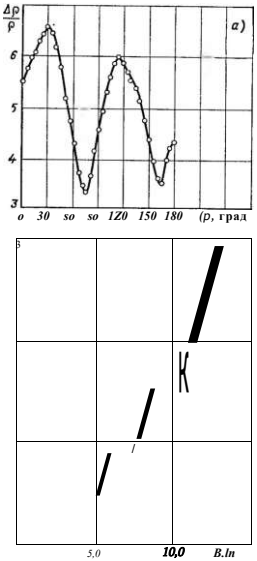


Рис. 30.36. Анизотропия Лр/р для монокристалла Pd [25] (й) (Г=4,2 К; В=2,3 Тл: ф — угол поворота магнитного пата в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец; ориентация кристалла 6=6°, 1=27°; 6 и 5 — полярный и азимутальный углы осей образца относительно главных осей кристалла) и зависимость Др/р от магнитной индукции (б) в направлениях минимума и максимума угловой диаграммы *а* **(см.** п. **2, с. 738)**

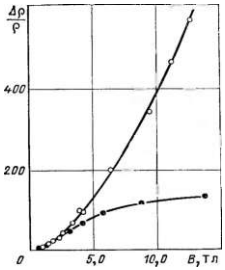


Рис. 30.38. Зависимость Др/р для R'e от магнитной индукции (Г=4,2 К) в направлениях максимума и минимума угловой диаграммы [31] (см. п. 4, с. 738)

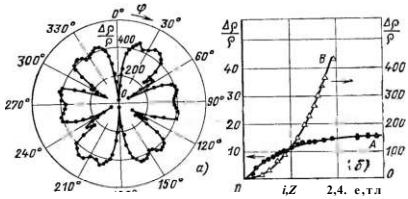


Рис. 30.39. Полярная диаграмма для монокристалла РЬ *(а)* [28] (RRR=10 000; Г=4,2 К; В=2,23 Тл; ср — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец; ось кристалла параллельна оси [111]) и зависимость Др/р для РЬ от магнитной индукции *(б)* в направлениях минимума (<р=0°) и максимума (ф=30°) полярной диаграммы *а* (см. п. 4, с. 738)

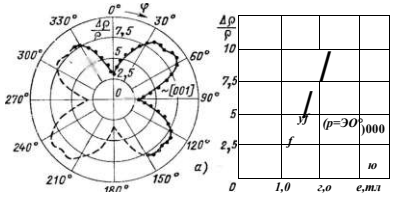


Рис. 30.37. Полярная диаграмма Др7р для монокристалла Pt [24] (RRR-1900; В=2,35 Тл; Г=4,2 К; ср — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через кристалл) и зависимость Др/р для Pt от магнитной индукции (б) в направлениях минимума и максимума полярной диаграммы а .(см. п. 4, с. 738)

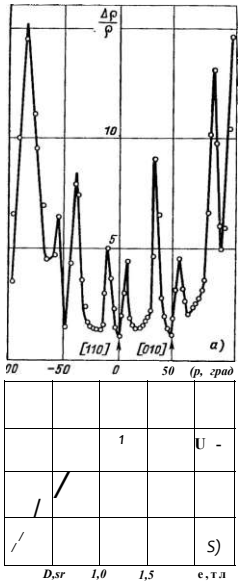


Рис. 30.40. Анизотропия Ар/р для монокристалла Ag (а) [36] (RRR = 1000; Т = 4,2 К; В = 2,35 Тл; ф — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец, ось образна направлена по [001] с точностью ±5°) и зависимость Ар/р для Ag от магнитной индукции (б) в направлениях минимума (Ф=0°) и максимума {ф-=80°) угловой диаграммы а:

1 – отсчет по левой шкале ординат; 2 – по правой (см. п. 2, с. 738)

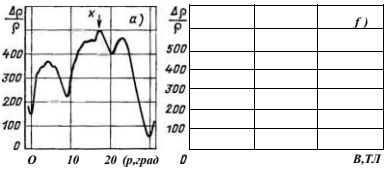


Рис. 30.41. Зависимость Др/р для монокристалла TI от угла между направлением магнитного поля в базисной плоскости и осью [1010] кристалла (о) (Т=4,2 К; В = = 13,4 Тл [37]) и от магнитной индукции (б) при *Т*= =4,2 К в направлении *х* на рис. *а* (см. п. 4, с. 6)

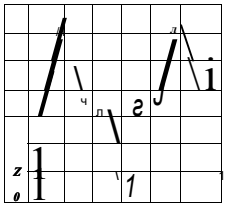


Рис. 30.42. Зависимость Др/р для монокристалла Zn от угла вращения магнитног^поля [391 (RRR=20 000; 7= =4,2 К; В=1,8 Тл: 11| [11Щ) поперечное вращение В в плоскости (1120). В II [1010] при **е**=0° (см. п. 4, с. 738)

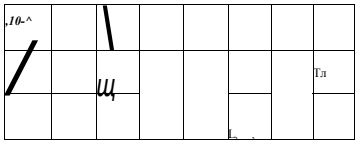


Рис. 30.43. Температурная зависимость Др/р для Gd [40] при различных значениях щН

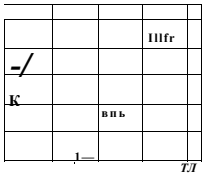
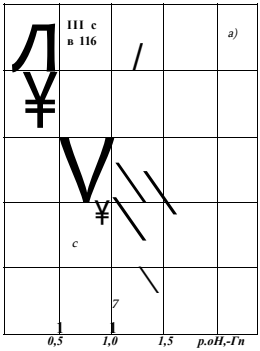


Рис. 30.44. Зависимость Др/р для Gd **01** XoW при *Т*= 205 К [41]



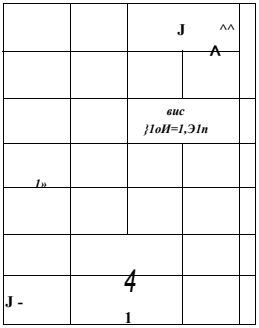


Рис. **30.45.** Зависимость **Др/р±** вдоль оси **с** от fXoH для монокристалла Но при **В||6 [42]** *(а)* (те же результаты получаются, если В||а) и зависимость **Лр/р** вдоль оси с от температуры (б) (различные точки относятся к разным циклам измерения).

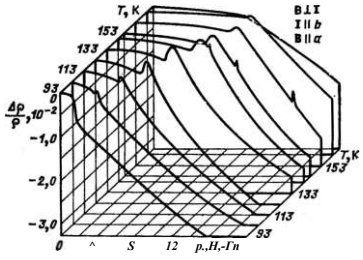


Рис. 30.46. Зависимость для Dy от [loH при различной температуре [43]

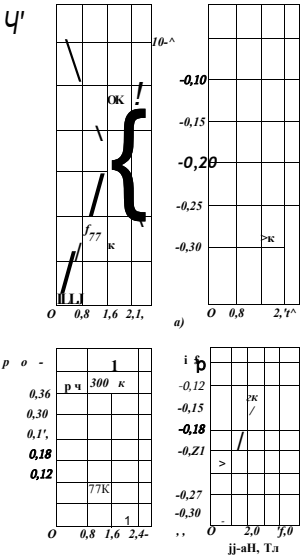


Рис. 30.47. Зависимость Др/р | для вискеров Fe от yiofi при температуре 300, 77 и 4,2 К [44]:
а-вдоль оси [100] В | |[100] (о 240 мкм. RRR-200): 6-вдоль оси [111) В||[1111 (0 300 мкм. RRR=360)

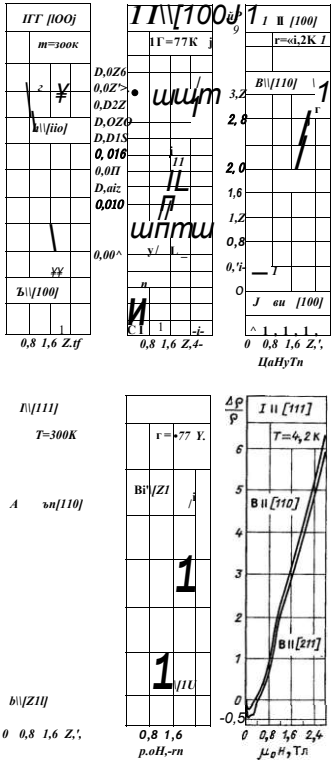


Рис. 30.48. Зависимость Др/pi для тех же (см. рис. 30.47) вискеров Fe от р,сЯ при температуре 300, 77, 4,2 К и различных ориентациях кристаллов [44]

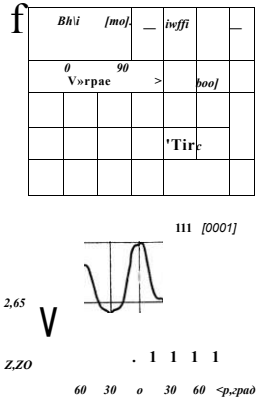


Рис. 30.49. Угловые диаграммы вращения и зависимость от *щН* Ар/pj^ для монокристаллов Со [45] *(Т=А,2* К; HcW=15 Тл; RRR=204; ф — угол вращения магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец)

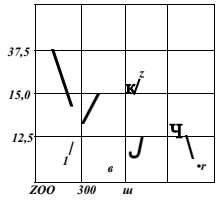
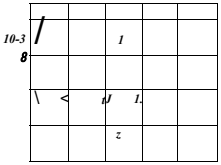
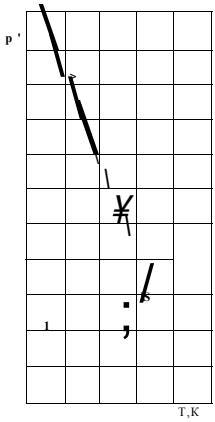


Рис. 30.50. Температурная зависимость насыщения Aps/p для Со при нагреве (/) и охлаждении (2) [46]



Рис, 30.51. Зависимость Ар/р и (/)и Ар/р ±(2) для Ni от цоЯ при <=20 "С [47]



РЦ и ..ps /р± для Ni **148]:**
О - Aps/p II : X - Др^/р J (6-0; А- Др5/р X (6-60°)
(в —угол между плоскостью образца и направлением магнит-

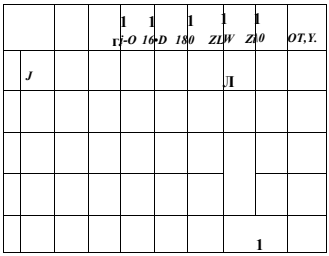


Рис. 30.53. Температурная зависимость Лр/р для ТЬ [49]:
/-Др/р II , ЦоН=1,5Тл; 2-Др/р|| , *р.,ff-0J8 Тл;* 3-Др/рц ^ цоЯ=0,13 Тл; 4-Др/р.J^, ЦоЯ-1.5 Тл

30.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ХОЛЛА МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.5 и 30.6 и на рис. 30.54—30.69 приведены сведения о коэффициенте Холла для различных материалов.

Таблица D.5. Значения коэффициента Холла для жидких металлов

Металл	*R*, 10-" м3/(А с)	*т.* к	Литература
Алюминий	—3,9	933—1123	[101]
Висмут	-3,0	558-603	11021
Галлий	—3,9	303—873	(Ю2]
Германий	-3,6	1233—1283	[102]
Золото	-11,8	1336-1423	1101]
Индий	—5,6	429—973	[101]
Кадмий	—7,2	594—673	[103]
Лантан	<0	—	[104]
Медь	-8,25	1356—1423	[101]
Натрий	-25	371	[102]
Неодим	<0	–	[104]
Олово	—4,4	523-593	[103]
Празеодим	<0	–	[104]
Ртуть	—7,6	303-483	[103]
Рубидий	-42	308	[99]
Свинец	—4,48	623	[105]
Серебро	—11,6	1273	[105]
Таллий	-12,6	500-1000	[102]
Церий	+8,0	873-1223	[106]
Цезий	—74,6-г-78,6	307—372	[107]
Уран	+3,8	273—1473	[104]

Таблица 30.6. Значения коэффициента Холла для металлов

Металл, чистота	г, к	в, Тл	R, 1С-" mV(A • c)
Алюминий 99,5%, RRR = 11	83	0,54	—2,2
То же	273	0,54	-3,3
	573	0,54	-3,9
	873	0,54	
Алюминий 99,9999%, RRR = 84 ч- 2600	2—80	0,5	См.'рис. 30.54
юкристаллический 99,5%	290	0,3-2,0	—77
ьспиллий монокристаллический 99,99%	290	0,3—2,0	-76,4
То же	290	0,3-2,0	148
			См. рис. 30.55
Ванадий 99,6%, RRR = 11,5	20		6,2
То же	300	–	7,9
Висмут монокристаллический	–	–	См. рис.
Вольфрам 99,9%	870	0,54	15,6
То же	273	0,54	П,1
	170	0,54	10,6
	80	0,54	12,0
Гафний 99,9%, RRR = 27,5	300	1,3	4,2
Тоже	200	1,3	3,0
	100	1,3	1,9
»	4,2	1,3	-2,6
Золото 99,9999%, RRR = 1957	300	1,52	-7,3
То же	4,2—300		См. рис.
Индий 99,9999%, RRR = 7100	300		—5,43
То же	6—280	6,3(<0Т>1)	16
			СМ.РИС.
Иридий, р (20 К)/р (300 К) = 0,21	300		
То же	81		3,49
Иттербии	300	0,55	35
То же	77	0,55	38
Иттербий RRR = 17	20-400	0,20	См. рис. 30.59
Иттрий, RRR=10, монокристаллический	300	1,0	4,7
То же	300	1,0	— 17,2
			См. рис. 30.60
То же, RRR = 15	4-300		См. рис. 30.60
Кадмий поликристаллический	90	1,0	10
То же	20	1,0	20
»	4,2	1,0	— 14
Кадмий монокристаллический	297		3,9
То же	297	–	13,9
Калий	300		—42
То же, RRR = 1000 Н- 8000	4—100	0,05—0,95	См. рис.
Кальций 99%	300	0,1	-17:8
Лантан 99,8%	20—300	0,56	-8
Литий, RRR = 850	300	0,95	
То же	4,2	0,95	
Лютеций, RRR==25	300"	0,55	Е.—. Г–
			Oj.p„e. 30.60
Магний 99,999%	300	0,4—2,5	
То же	300	–	
	300		–0,f
Марганец	297	0,6—2,9	
а-Марганец	4—300		^.рис.
Меда, 99,9999%	300	1,5	
То же	150	1,5	—5,4
»	50	1,5	—6,3
»	40	1,5	—6,8
»	4	1,5	—6,5
То же, RRR = 150	<80	0,0085-0,51	См. рис.
Молибден	873	0,54	17,6
»	273	0,54	18,0
x	83	0,54	17,9
Тоже, RRR = 32000	4—150	1,25	См. рис. 30.65

Металл, чистота	*T*, К	*B*, Тл	*R*, 10⁻⁸ м·Ом/(А · с)	Литература
Натрий	300	1,0	—13,2	77]
»	78	1,0	—12,4	
»	20	1,0	—12,7	771
То же, RRR = 1500 Ч- 6700	4—100	0,525—0,945	См. рис. 30.66	681
Неодим 99,98%	293	0,56	9,71	70]
То же	—	—	См. рис. 30.67	70]
Ниобий. RRR = 13	300	3,0	8,72	78]
То же	77	3,0	8,50	78
»	4,2	3,0	9,54	78
Олово 99,9%	294	0,81	—0,22	79
Тоже, RRR=: 60000	4,2	0,69	**«в,иооТ1 = - 4 8**	80]
Осмий, RRR = 12	300			81]
Палладий	300	—	-7^5	82
»	115		—6,2	82
	4,2		—7,8	83
Платина 99,9%	300	0,54	—2,2	[501
То же	170	0,54	—1,8	Г501
»	80	0,54	—2,0	
к-Плутоний	6—438		См. рис. 30.63	84]
Р-Плутоний	1100—438	—		
				21
7-Плутоний		-		84]
	п		{3?	84]
Празеодим 99,9%	20-300	1,0	См. рис. 30.67	
То же	300	—	7,1	701
Рений, RRR = 38	300	1,5	22	
Тоже	200	1,5	28	
»	100	1,5	32	
Родий 99,9%	300	0,49	5,02	Г861
Рубидий дистиллят	300	-	—50	87]
То же, RRR = 489—441	-	0,95	См. рис. 30.68	71
Рутений	300	0,49	+22	88
Самарий 99,9%	300	0,55	—2	
Тоже, RRR=17,3	17	0,55	28	*lq*
	2,4	0,55	16	891
Свинец 99,9%, RRR = 6 • 10^	293		0,98	PO]
То же монокристаллический	4,2	2,3	**^ в II [110] = 43**	[91]
Серебро 99,9999%, RRR = 918	300	1,52	**—8,98 (См. рис. 30.57)**	157]
Скандий 99,86%	300	1,3	-6,7	[92]
Тоже	4,2	1,3	-3,0	92
Таллий	297	1,7—1,8	2,4	93
Тантал	300	0,54	10	94
Титан 99,97% моиокристаллический	300	0,95		195]
То же	300	0,95		[95]
а-Торкий, RRR=18,2	297	3,0		171]
То же	"	3,0	— 10,35	[71
»	4,2"	3,0	—9,7	[71]
Тулий поликристаллический 99,9%	300	0,55	—15	61]
То же, RRR = 7,4	-	-	—23,5	961
Хром 99,9%		1,0—2,9	+36,3	97]
То же, RRR = 15	**& 0**	1,0	См. рис. 30.69	98]
Цезий 99,9%	293		-73; 2	991
То же	200		—71,5	991
Церий 99,8%	293	**0,56**	+ 18,1	701
Цинк 99,999% **шокристаллический**	297	**1,86**		[100]
То же	297	1,86		[100]
»	77	1,86	**'«в ▮ г, = >8,5**	[100]
»	77	1,86		1100J
Цирконий, RRR = 27	300	0-1,5	15,5	
То же	200	0-1,5	8,0	**[85]**
»	100	0-1,5	4,5	
Уран, RRR = 12	273	3,0	3,93	**78]**
То же	77	3,0	4,75	781
»	4,2	3,0	—0,31	78]

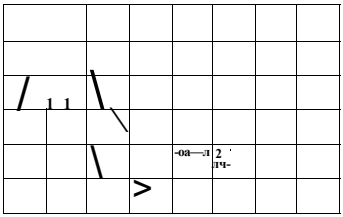


Рис. 30.54. Температурная зависимость коэффициента Холла в слабом магнитном поле ((от<1) для чистого Al [51]:
e - RRR - 2380 и 6 W; X - RRR = 2600 и 6N; + - RRR - 1810 и 5 W; 0 - RRR - 84 и 4 W (6 W - чистота образца, соответствующая 99,9999%; нижняя кривая — теоретическая)

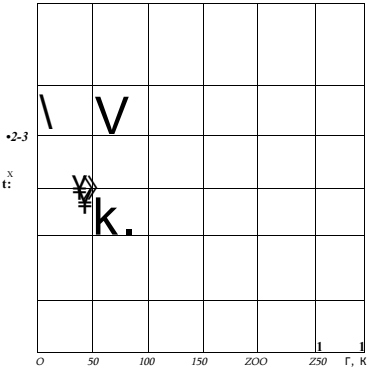


Рис. 30.57. Температурная зависимость коэффициента Холла для чистых образцов (99,9999%) Ag, Ли и Си [57]: ф — Ag, отожженный образец; О — Аи, неотожженный образец; X — Си, неотожженный образец; + — Си, отожженный образец толщиной 0,929 мм. А — Си, отожженный образец толщиной 1,719 мм

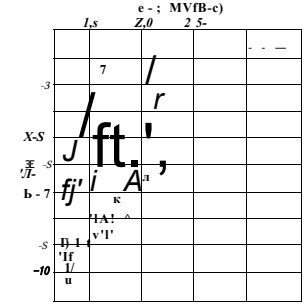


Рис. 30.55. Температурная зависимость коэффициента Холла для гексагонального монокристалла Be [53]

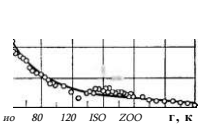


Рис. 30.58. Температурная зависимость коэффициента Холла монокристалла In [59] (магнитное поле B=6,3 Тл ориентировано вдоль оси [101] кристалла)

Рис. 30.56. Полевая зависимость коэффициента Холла монокристалла Bi при 7=1,4 К [55]:
1 — угол между направлением магнитного поля и тригональной параллелен бинарной оси; 2 — 1 параллельно тригонал и; 3 — 1 кулярно тригональной оси; Дх—® II тригональной оси; ^ц ~ B|1 тригональной оси

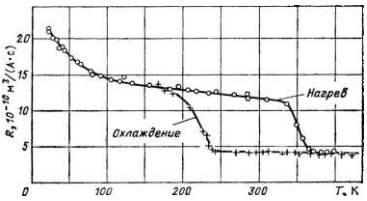


Рис. 30.59. Температурная зависимость коэффициента Холла монокристалла Yb (RRR=17; B=2,0 Тл) [62]

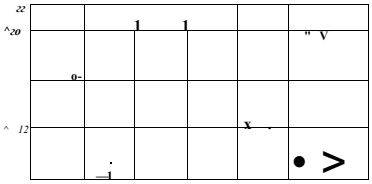


Рис. 30.62. Температурная зависимость коэффициентов Холла ***R*** и Риги—Ледюка ***AboT*** (Lo* — число Лоренца, ***T*** —• температура) для Li [71]

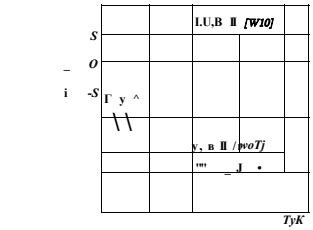


Рис. 30.60. Температурная зависимость коэффициента Холла для Y и Lu (сплошные линии [63], штриховые — [64])

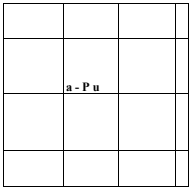


Рис. 30.63. Температурная зависимость коэффициента Холла для поликристаллических образцов а — Мп [74] и а — Ри [84]

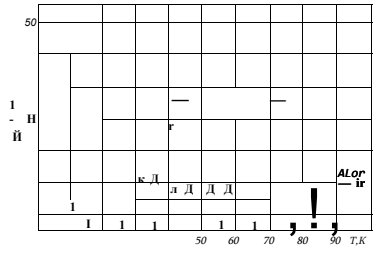


Рис. 30.61. Температурная зависимость коэффициентов Холла R и Риги—Ледюка ***AboT*** (Lo* — число Лоренца; Lo= - (- j 1 К \2 = 2,45 • 10-8 Вт-Ом ; ***T*** - температура) для чистых образцов К [68]:
О-RRR-720; А-RRR-700; П ~ RRR=2000; ф - RRR=> =2900; RRR-7900; RRR-640; В-1 Тл

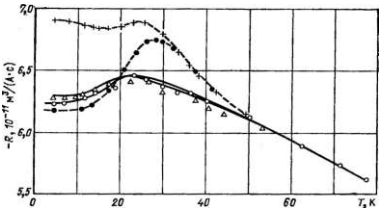


Рис. 30.64. Температурная зависимость коэффициента Холла для Си [75]:
ф Д — образец 1; **+, О — образец** 2; B=0,5145 Тл; B-0,0085 Тл

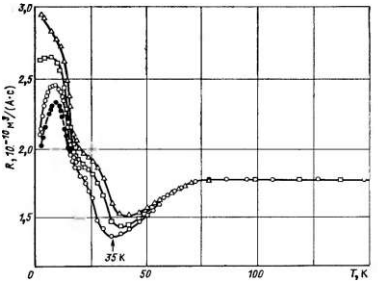


Рис. 30.65. Температурная зависимость коэффициента Холла для монокристалла Mo [76]:
///||<100>, ф-В=0,25 Тл; О - В-Мб Тл; О - В-0,85 Тл; Л —В-1,25 Тл

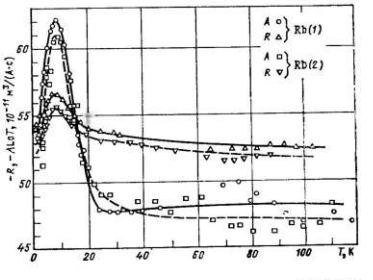


Рис. 30.68. Температурная зависимость коэффициентов Холла R и Риги — Ледюка AL.ojT для Rb [71

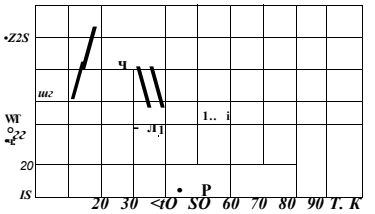


Рис. 30.66. Температурная зависимость коэффициентов Холла R и Риги—Ледюка ЛЬоГ (Lo* — число Лоренца, *T* — температура для Na [68]):
RRR=1500: ф. + - охлаждение: О. X - нагрев

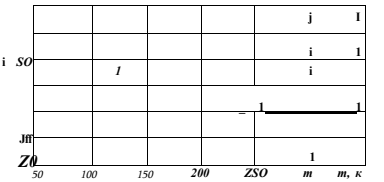


Рис. 30.69. Температурная зависимость коэффициента Холла для Cr [98]:
1 — до отжига; 2 – после от

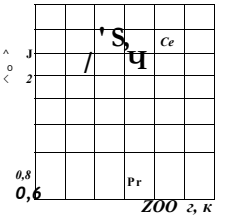


Рис. 30.67. Температурная зависимость коэффициентов Холла для поликристаллических образцов

30.5. КОЭФФИЦИЕНТЫ ХОЛЛА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.7 и 30.8 приведены коэффициенте Холла ферромагнетиков и редкоземельных металлон.

Таблица 30.7. **Значения коэффициентов Холла дли ферромагнитных металлов**

Металл, чистота	*m.* к	Тл	10-'« м~/(А - с)	*H^,* 10-»« MV(A C)	Литература
Железо 99,99%, RRR = 20	293	0-3,3	0,2	6,8	[108]
То же поликристаллическое	4,2-300	–	См. рис. 30.70		[109]
Железо, вискеры, RRR = 180-^452	1—300	–	См. рис. 30.70		[110]
Тоже 99,99%	1-800	–	См. рис. 30.71		[111]
Кобальт 99,99%, RRR = 60	293	0—2,8	—0,84 1]	0,14	109
То же 99,99%	273-1400	0,23	См. рис. 30.72		112
Никель 99,999% , RRR = 480	293	0-2,9	-0,56 l]	-5,0	113
То же 99,999%	Г > Г с	0,85	-1,08]	-41	114
То же	70-700	–	См. рис. 30.73		[115]

Таблица 30.8. **Значения коэффициентов Холла для магнитных редкоземельных металлов**

Мета.пл, чистота	*m.* к	*Rt,* 10-«» М~/(А • с)	*R^.* 10-" М~/(А С)	Литература
Гадолиний 99,9%, RRR = 51, поликристаллический		-2	-384	[116]
Гадолиний, RRR = 20, монокристаллический			—225*1; —452*=»	
То же, RRR = 40	***T<Tc***	См. рис 30.74		[64]
Гольмий 99,9%, RRR=12, поликристаллический		-2,2	-2,8	[117]
То же моноикристаллический	***T>Tc***	-3,2«; +0,	-13,2*1; 4-2,2*=»	[118]
Диспрозий 99,9%, RRR=10, монокристаллический		—5,7«; —1, 0*2	—25,5*1; —32,6*"	[119]
Диспрозий, монокристаллический, RRR = 16	***T<Tc***	См. рис 30.75		[120]
Тербий 99,9%, RRR = 46, поликристаллический		—4,4	-42	[121]
То же, RRR = 20, монокристаллический	***T>m,***	—4,0*1; —1,	—52*1; _4o*2	[122]
Тербий монокристаллический		См. рис. 30.76		[123]
Эрбий поликристаллический	***T>Tc***	—0,34	–	[70]
Эрбий монокристаллический		—3,6*1; 0,3*=»	—9,4*1; 4,4*2	[1241

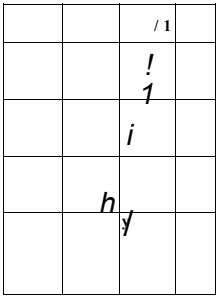


Рис. 30.70. Температурная зависимость аномального коэффициента Холла К^для усов Fe [110] (штрихпунктирная линия—для поликристаллического Fe [109]):

Образец	Направление I и оси усов	Направление В	Направление ЭДС *Холла*	RRR
X	[111]	[110]	[112]	196
Л	Ё111]	[110]	[112]	213
О	[100]	[010]	[001]	213
•	[100]	[010]	[001]	452
V	[100]	fOlO]	[001]	180

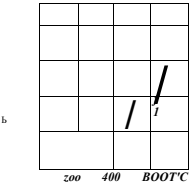


Рис. 30.71. Температурные зависимости аномального коэффициента Холла Rs (/) и удельного электросопротивления р (2) для Fe [111]

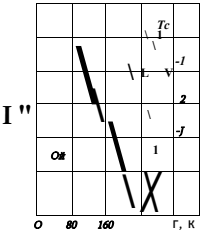


Рис. 30.74. Температурная зависимость аномального и обыкновенного коэффициентов Холла для монокристалла Gd [64]:

/ - « о , в в базисной плоскости; 2 - Л , , В в базисной плоскости; з - / ? „ . В ||с; ||с

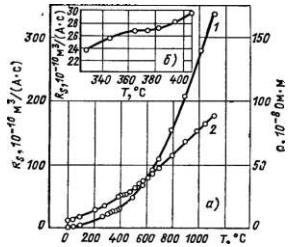


Рис. 30.72. Температурные зависимости аномального коэффициента Холла ***Rs U)*** и удельного электросопротивления р (2) для Со [112] (а) и температурное изменение в окрестности фазового превращения ***(б)***

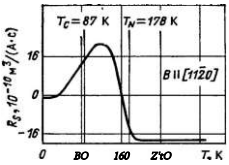


Рис. 30.75. Температурная зависимость аномального коэффициента Холла ***Rs*** для монокристалла Dy [120]

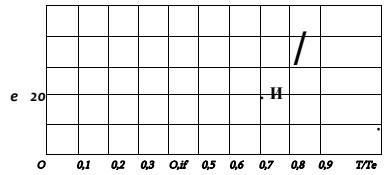


Рис. 30.73. Температурная зависимость аномального коэффициента Холла ***Rs*** для Ni [115] *(**Tc*** — температура Кюри)

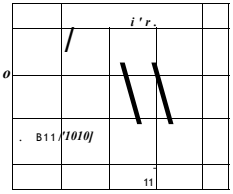


Рис. 30.76. Температурные зависимости обыкновенного ***Ro*** и аномального ***Rs*** коэффициентов Холла для монокристалла ТЬ [123]

30.6. ТЕРМОМАГНИТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.9 и 30.10 и на рис. 30.77 — 30.82 приведены данные о термомагнитных характеристиках металлов.

Таблица 30.9. Значения термомагнитных коэффициентов дли металлов

Металл, чистота	m, к	A, 10-Зм»/(В-с)	Q, 10-» MV(K-C)	Литература
Алюминий 99,5%	313	—0,63	+0,39	[12Б
Вольфрам	332	+ 1,5	-10	[125
Золото*'		См. рис.	30.77	126
Иидий			30.78	[127]
Иридий, RRR = 23	323		-0,05	[125]
То же	300	–	—0,44	[81]
Иттрий»='	293		–	128]
Кадмий	320	+0,89	-1,20	125]
Калий*!		См. рис.	30.61	68
Литий*!		См. рис.	30.62	71]
Марганец	330	-	11 +0,15	125]
Медь*з		См. рис.	30.77	126]
Молибден	333	-	11 —1,72	125]
Натрий*!		См. рис.	30.66	[68]
Ниобий		См. рис.	30.79	129]
Олово	330	–	-0,04	125]
Осмий, RRR= 12	300	–	-2,32	
Палладий*®	323	—0,487	+3,27	]
Платина, RRR = 5,4	300	—0,21		125]
То же	300	–	-1,68	m
Рений, RRR = 447	300	–	-6,4	[81]
Родий		См. рис.	30.80	[130]
Рубидий*!		См. рис.	30.68	[71]
Рутений		См. рис.	30.80	130
Свинец	300	-	1 -0,05	125
Серефо*!		См. рис.	30.77	126
Таллий	333	-	1 -0,37	125
Тантал		См. рис.	30.80	130
Цинк	323	+1,29	1 —2,40	125]

•1 Для металлов со знаком представлены рисунки температурных зависимостей коэффициентов Риги _ Ледюка Л, значения которых умножены на UT =

для более удобного сравнения их с коэффициентами Холла,
" P -75.10-' K MV(B-A-C);
•1 р = 16.2-10-" К-м»/(В-А-с).

Таблица 30.10. Значения термомагиитных коэффициентов для ферромагнитных металлов

Металл	Г, к	в, к	Pi, 10-« K-MV(B-A-C)
Железо	313	2,3	—20,3
Кобальт	298	0,95	87
	300-900		
Никель	313	0,667	55
	2-450		

Продолжение табл. 80.10

Металл	10-3 MV(B-C)	Q, Ю-» MV(K C)	Литература
Железо	3,28	-20,4	[1311
Кобальт	3,77	19	125
»	–	См. рис. 30.81	132
Никель	—49	48,2	133
»	–	См. рис. 30.82	125

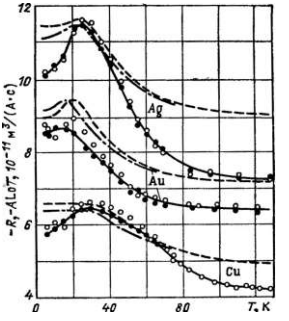


Рис. 30.77. Температурные зависимости коэффициентов Холла *R* и Риги—Ледюка *AhoT* для Ае, Аи и Си [126]: В-0,935 Тл; -.-.-.-Я. В-0.518 Тл; О --^Lor, B=0,935 *1* . *ф~ALoT.* B=0,518 Тл

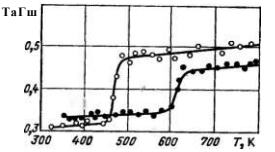


Рис. 30.78. Температурная зависимость коэффициента Нериста для T1 (•) и In (О) в твердом и жидком состоянии [127]

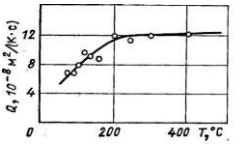


Рис. 30.79. Температурная зависимость коэффициента Нериста для Nb [129]

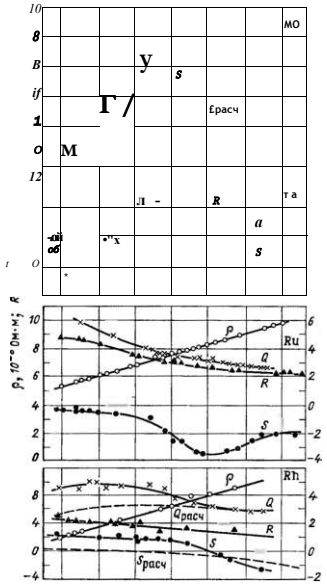


Рис. 30.80. Температурные зависимости удельного электросопротивления ρ, термо-ЭДС S, константы Холла R и константы Нериста Q для некоторых материалов [130]

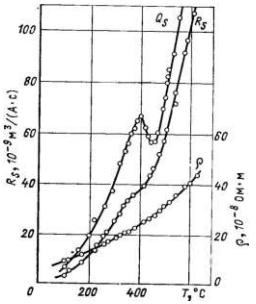


Рис. 30.81. Температурные зависимости коэффициентов Холла *Rs*, Нериста *Qs* и удельного электросопротивления ρ для Со [132]

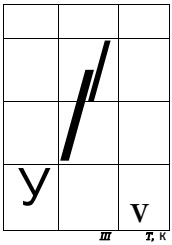


Рис. 30.82. Температурная зависимость коэффициента Нериста Q, для Ni [125]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайдуков Ю. П.//Успехи физ. наук. 1970. Т. 100. Вып. 3. С. 449—466.

2. Крэкнелл А., Уонг К. Поверхность Ферми: Пер с англ./Под ред. В. Я. Кравченко. М.: Атомиздат. 1978

3. Harrison W. A., Webb M. B. Thg Fermi Surface. N. Y. — Lond.: Jolin Woley. 1960.

4. Лифшиц И. JW. Азбель JW. Я., Каганов М. И. Электронная теория металлов. М.: Наука. 1971.

5. IVleaden G. T. Electrical resistance of metals. N. Y.: Plenum Press. 1965.

6. Fawcett E.//Advances Phys. 1964. Vol. 13, N 50. P. 139—153.

7. Hurd C. M. The Hall Effect in Metals and Alloys N. Y.: Plenum Press, 1972.

8. Fickeff F. R.//Phys. Rev. 1971. Vol. B3. P. 1941.

9. Rocofyllou E., Papathanassopoulov C.//Physica. 1980. Vol. BC 100, N 1. P. 99-100

10. Justi £., Kramer J.//Physical Z. 1940 Bd 41 S. 197—205.

11. Kapitza P. Proc. Roy. Soc. (Lond.), 1929. Vol. A123. P. 292, 342.

12. Алексеевский Н. Е., Егоров В. С.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1963. Т. 45, № 2. С. 388—391.

13. Landolt-Bornstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Austronomie, 6 Tail, Elektrische Eigenschaften 1. Berlin, Gottingen — Heidelberg: Springer — Verlag, 1959.

14. Волкенштейн Н. В., Новоселов В. А., Старцев В. Е.//Физика металлов и металловедение 1966. Т. 22, № 2. С. 175—180.

15 Reed W. A., Marcus J. A.//Phys. Rev. 1962. Vol. 126. N 4. P. 1298—1300.

16. McClure P. W., Spry W. J.//Phys. Rev. 1968 Vol. 165. N 3. P. 809-815.

17. Janos sC Fener A., Flachbart K.//Phys. Stat. Sol. (b). 1977. Vol 81. N 1. P. K19—K23.

18. Justi E. Physical Z. 1940. Bd 41. S. 486—490.

19. Гайдуков Ю. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ 1959. Т. 37, № 5 С. 1281-1291.

20. Волоцкая В. Г.//Там же. 1963. Т. 45. № I. С. 49-51.
21. Лазарев Б. Г., Нахимович Н. М., Парфенова Е.А.//Там же 1938. Т. 9, № Ю. С. 1169—1178.
22. Penz P. A., Bowers R.//Pliys. Rev. 1968. Vol. 172. № 3. P. 991—1000.
23. Gugan D., Jones B. K.//Helv. Phys. Acta. 1963. Vol. 36, N" 1. P. 6^11.
24. Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 38, № 6. С. 1720—1722.
25. Алексеевский Н. Е., Егоров В. С., Карстенс Г. Э., Козак Б. Н.//Там же. 1962. Т 43, № I. С. 731—733.
26. Babiskin J., Siebenmann P. G.//Phys. Kondens Materia. 1969. Vol. 9(1/2). P. 113—121.
27. Nagasawa H.//Phys. Lett. 1972. Vol. 414, № 1. P. 39—40.
28. Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1959. Т. 36, № 2. С. 446—449.
29. Алексеевский Н. Е., Дубровин А. В., Карстен^. Э^^Михайлов Н. Н.//Там же. 1968. Т. 54, № 3.
30. Aschermann O., Justi E.//Physikal Z. 1942. Bd. 43. S. 207-210.
31. Алексеевский Н. £., Егоров В. С., Козак Б. Н.// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1963. Т. 44, № 3. С. 1116-1118.
32. Schulze R.//Physik Z. 1941. Bd. 42. S. 297.
33. MacDonald D. K. C.//Philos. Mag. 1957. Vol. 2, № 13. P. 97—104
34. Болотин Г. А., Новоселов Н. А., Старцев В. Е.// Физика металлов и металловедение. 1972. Т. 33, № 4. С. 740-743.
35. Боровик Е. С.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1954. Т. 27, № 3. С. 355—368.
36. Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.//Там же. 1959. Т. 37, № 3. С. 672—677.
37. Young R. C.//Phys. Rev 1967. Vol. 163. № 3. P. 676-€85.
38. Justi E.//АПП. Physik. 1948. Bd(6)3. S. 183—190.
39. Reed W. A., Brennert G. F.//Phys. Rev. 1963. Vol. 130. N" 2. P. 565—576.
40. Бабушкина Н. А.//Докл. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т. 155, № 6. С 1290—1292.
41. McEven K. A., Werbber G. D., Roeland L. W.// Physica. 1977. Vol. 86—88B. P. 531—532.
42. Akhavan M., Blackstead H. A.//Phys. Rev. B. 1976. Vol. 13, № 3. P. 1209—1215.
43. Akhavan M., Blackstead H. A.//Ibid. 1973. Vol. 8, № 9. P. 4258—4261.
44. Isin A., Colemann R. V.//Phys. Rev 1966. Vol. 142, N» 2. P. 372-378.
45. Colemann R. V., Morris R. S., Sellmeyer D. J.// Phys. Rev. B. 1973. Vol. 8, N» 1. P. 317—331.
46. Богма К. К., Зубов В. В.//Физика металлов и металловедение. 1965. Т. 20, № 1. С. 135—137.
47. Белов К. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1951. Т. 21, № 5. С. 809-812.
48. Kaul S. N.//J. Phys F. 1977. Vol. 7, N" 10. P. 2091—2098.
49. Белов К. П., Никитин С. А.//Физика металлов и металловедение, 1962. Т. 13, № 1. С. 43—48.
50. Frank V.//Appl. Sci. Res. 1958. Vol. B7. P. 41—45
51. Barnard R. D., Addel Rahiem AEE//J. Phys. F 1980. Vol. 10, № 12. P. 2739—2749.
195? T® 2з"T L C^M-ST""' "
^^^53."Shi'oza'ki'j.//Phys. Lett 1974. Vol. A50. P. 203—
Й. АМПНН Е. Б., Ковалевская Ю. А., Ковдри Ю. З.// Физика твердого тела. 1967. Т. 9. С. 905—908.
55. Reynolds J. M., Hemstreet H. M.//Phys. Rev. 1954. Vol. 96. P. 1203-^1207.
56. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.//Физика металлов и металловедение. 1964. Т. 18. С. 784—786.
57. Alderson J. E., Parrel T., Hurd C. M.//Phys. Rev. 1968. Vol. 174. P. 729—736.
58. Cooper J. N.. Cotti P., Rasmussen F. B.//Phys. Lett. 1965. Vol. 19. P. 560-562.
59. Ozimek E. J., Leisure R. G.//Ibid. 1978. Vol. A66, N» 5. P. 413—415.
60. Gehlhoff P. O., Justi E., Kohler M.//Z. Naturforsch. 1950. Vol. 5a. S. 16—18, 1949. Vol. 4a. S. 561—563.
61. Anderson G. S., Legvold S., Spedding F. H.//Phys. Rev. 1959. Vol. 111, № 5. P. 257-261
62. Anderson J. E., Hurd C. M.//Solid State Comm. 1972. Vol. 11. P. 1245—1248.
63. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.//Физика металлов и металловедение. 1967. Т. 24. С 1105- 1107
P 43?' «5 ^ S.//Phys. Rev. 1967. Vol. 162,
65. Saeger K. E., Luck R.//Phys. Kond. Mater. 1969. Vol. 9. P. 9I—94.
Hu.lin A. S.//Phi,os. Mag.
67. Cirles W.//Z. Physik. 1957. Bd. 147. S. 481—485.
68. Fletcter R., Friedman A. J.//Phys. Rev. 1973. Vol. B8. P. 5381—5390.
69. Frank v., Jeppesen O. G.//Ibid. 1953. Vol. 89. P. 1153—1154.
70. Kevane C. J., Legvold S., Spedding F. H.//Ibid. 1953. Vol. 91. P. 1372-1379.
71. Eletcher R.//Ibid. 1977. Vol. 15. P. 3602—3608.
72. Alty J. L., Stringer J.//Phys. Stat. Sol. 1969. Vol. 32. P. 243—246.
73. Foner S.//Phys. Rev. 1957. Vol. 107. P. 1513-1516.
74. Meaden G. P. T., Pelloux-Gervais P.//Cryogenics. 1967. Vol. 7. P. 161-166.
75. Barnard R. D.//J. Phys. F. 1980. VoL 10. № 10. P. 2251—2255.
76. Черепанов В. И., Старцев В. Е., Волкенштейн Н. В.//Физика низких температур. 1979. Т. 5. С. 1162—1167.
77. Justi E.//АПП. Physik. 1948. Vol. 6. P. 183—186.
78. Berlincourt T. G.//Phys Rev. 1959. Vol. 114. P. 969—977.
79. Andrewartha G. G., Evans E. J. Philos. Mag. 1941. Vol. 31. P. 265—282.
80 Качинский В. Н.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1962. Т. 43. № 10. С. 1158-П63.
81. Немченко В. М., Львов С. Н., Малько П. Н., Делиев В. Н.//Физика металлов и металловедение. 1972. Т. 33, № 3. С. 540—545.
82. Plate H.//Phys. Kond. Mater. 1966 Vol. 4. P. 355—359.
83. Schwaller R.//Compt rend. 1967. Vol. 264. P. 1064—1067.
84. Brodsky M. B.//Phys. Rev. 1965. Vol. 137. P. A1423—1428.
85. Волков Д. Н., Козлова Т. М., Прудников В. Н., Козис (F- ® эксперим. и теорет. физ. 1968. Т. 55,
86. Koster W., Hagmann D., Saeger K. E.//Z. Metalkunde. 1963. Bd. 54. S. 619—622.
87. Факидов И. Г.//Докл. АН СССР. 1948. Т. 63. № 2. С. 123—425.
88. Justi E.//Z. Naturforsch. a. 1949. Bd. 4. S 472—474.
89. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7, № 11. С. 3213—3217.
90. Такапо К., Sato T.//J. Phys. Soc. Japan 1965. Vol. 20. P. 2013—2016.
91. Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 41, № 2. С. 354—357.

92. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.//Физика металлов и металловедение. 1963. Т. 16, № 2. С. 298—301.
93. Smith A. W.//Phys. Rev. 1916. Vol. 8. P. 79—83.
94. Krautz E., Schultz H.//Z. Augewdte Phys. 1963. Vol. 15. P. 1—6.
95. Scovil G. N.//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 247—248.
96. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. — Физика металлов и металловедение. 1965. Т. 20. С. 508—511.
97. Foner S.//Phys. Rev. 1957. Vol. 107. P. 1513—1516.
98. Амитин Е. Б., Ковалевская Ю. А.//Физика твердого тела. 1968. Т. 10, № 6. С. 1884—1886.
99. Kendall P. W.//J. Nucl. Mat. 1970. Vol. 35. P. 41—50.
100. Lane Y. S., Huglin A. S., Stringer J.//Phys. Rev. 1964. Vol. 135. P. A1060—A1068.
101. Busch G., Guntherodt H. — J.//Phys. Kond. Mater. 1967. Vol. 6. P. 325—327; Advances. Phys. 1967. Vol. 16. P. 651—660
102. Busch G, Y. Thieche//Phys. Kond. Mater. 1963 Vol. 1. P. 78—81.
103. Greenfield A.//Phys. Rev. 1964. Vol. 135. P. A1589—A1595.
104. Busch G., Guntherodt H. - J., Kunzi H. U.// Phys. Lett. 1970. Vol. 32A. P. 376—377.
105. Shackle P. W.//Philos. Mag, 1970, Vol. 21. P. 987—1002.
106. Busch G., Guntherodt H. — J., Kunzi H. U., Schiapbach L.//Phys Lett. 1970. Vol. 31A. P. 191—192,
107. Факидов И, Г.//Докл. АН СССР. 1948 Т. 63 С. 123—125.
108. Softer S., Dreesden J. A., Pugh E. M.//Phys. Rev. 1965. Vol, 140. P. A668—A675.
109. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.//Журн. эксперим. и теорет, физ, 1960. Т. 38. С. 64—68.
ПО. Dheer P. N.//Phys. Rev. 1967. Vol. 156. P. 637-644.
111. Tsonkalas J. A.//Phys. Stat. Sol. (a). 1974. Vol.22, № 1. P. K59—K63.
112. Tsonkalas J. A.//Ibid. 1974. Vol. 23, N" 1 P. K41—K45.
113. Hugnenin R., Rivier D.//Helv. Phys. Acta. 1965. Vol. 38. P. 900 -912.
114. Dutta Roy S. K., Subrahmanyam A. V.//Phys, Rev. 1969. Vol. 177. P. 1133—1138.
115. Kaul S. N.//Ibid. 1979. Vol. B20. № 12. P. 5122-5130.
116. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.//Журнал эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 50. С. 1505—1Ь09.
117. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.// Физика твердого тела. 1966. Т. 8. С. 1895—1898.
118. CuHen P. R., Rhyne J. J., Mancini F.//J. AppL Phys. 1970. Vol. 41. P. 1178—1181
119 Волкенштейн Н. В., Григорова И. К., Федоров Г. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 51,
120. Rhyne J. J.//Phys. Rev. 1968. Vol. 172. № 2. P. 523—529.
121. Бабушкина Н. А.//Физика твердого тела, 1965. Т. 7. С. 3026-3032.
122. Федоров Г. В., Волкенштейн Н. В.//Там же. 1970. Т. 12. С. 1374—1379.
123. Rhyne J. J.//Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 1001—1003.
124. Rhyne J. J., O'Connor M. C.//Bull. Amer. Phys. Soc. 1969. Vol. 14. P, 306—310.
125. Landolt-Boriistein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften. Berlin, Gottingen — Heidelberg: Springer-Verlag, 1959.
126. Fletcher R., Friedman A. J., Stot JW. J.//J. Phys. F: Metal Phys. 1972. Vol. 2, N" 4. P. 729—762
127. Кувандиков О. К., Субхакулов И., Даминов А.// Физика металлов и металловедение. 1977. Т. 44. Вып. 3. С. 670—671.
128. Zeechina L.//Phys. Stat. Sol. 1970. Vol. 42. P. K153—K155.
129. Кувандиков О. К., Черепанов А. В., Васильева. Р. П., Шакеров В. 0.//Изв. вузов. Физика. 1977. №8. С. 128-129.
130, Мясникова К. П., Васильева Р. П., Черемушкина А. В. — Изв. АН СССР, Сер. Металлы. 1975, № 6. С. 185—188.
131. Butler E. H., Pugh E. JW.//Phys. Rev. 1940 Vol. 57. P. 916—920.
132. Черемушкина А, В., Васильева Р. П.//Физика твердого тела. 1966. Т. 8, № 3. С, 822- 825.
133. Rinder W., Koch K. M. Z, Naturforsch. a. 1958. Bd 13. S. 26—528.

Глава 31

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Л. А. Новицкий

31.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В главе приведены значения оптических характеристик твердых, жидких и газообразных веществ при различных параметрах их состояния. Даны аналитические зависимости, позволяющие использовать эти значения при практических расчетах. Оговаривается достоверность приведенных значений оптических характеристик (указывается обычно средняя квадратическая относительная погрешность измерения при доверительной вероятности 0,68). В некоторых таблицах указания о погрешности измерения отсутствуют. Это соответствует случаям, когда в литературных источниках достоверность данных не была оговорена. Значения оптических характеристик в таких таблицах следует рассматривать как ориентировочные.

Определение оптических характеристик и их единицы даются в соответствии с ГОСТ 7601—78, ГОСТ 23778- 79, СЭВ 1052—78. ГОСТ 13659—78. ГОСТ 15130—79, ГОСТ 9411—81 В.

Показателем преломления n называют отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме *с* к фазовой скорости излучения в данной среде; *n* для длины волны Я=546,07 им называют *основным показателем преломления* Поон. Величины *n* и Поон — безразмерные.

Уменьшение интенсивности излучения в веществе в результате поглощения характеризуется *главным показателем поглощения %.*

Величины я и Х называют *оптическими постоянными.*

Связь между оптическими постоянными, электрическими и магнитными характеристиками диэлектрической

среды, являющаяся важнейшим выводом электромагнитной теории света, определяется уравнением

а при I

где е — относительная диэлектрическая проницаемость; |х _ относительная магнитная проницаемость.

Для ряда газообразных и жидких диэлектриков результаты расчета *п* с помощью этого уравнения хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Для металлов связь их оптических постоянных с электрическими характеристиками задается уравнениями

и

$$n=2nc^{*}/o\},$$

где о* — удельная проводимость металла; w — круговая частота потока излучения.

Результаты расчетов по этим уравнениям достаточно хорошо согласуются с данными эксперимента в инфракрасной области спектра, где для оптических свойств металла главную роль играют свободные электроны

В видимой и ультрафиолетовой областях спектра оптические свойства вещества в сильной степени зависят от связанных электронов. Значительно более явно выраженной становится зависимость и от длины волны потока излучения; выводы электромагнитной теории, приписывающие величине *п* некоторое квазипостоянное значение, характерное для данного вещества, расходятся с действительностью.

В этом случае уравнения, учитывающие длину волны (частоту) излучения, его затухание в веществе, действие окружающих молекул на смещение электрона под воздействием внешнего поля, влияние свободных и связанных электронов, выводятся из теории дисперсии и имеют вид:

для диэлектриков

$$я2 = 1 \ , \ 4л — iV -: \ ;$$

для металлов

$$(i'^{\wedge} + igolmr$$

$$2и2/ = \bullet \quad \frac{gim}{}$$

$$\_ \quad V \quad ^{\wedge}\_\_\_\_\_ <Д \ (ghim)$$

Здесь ы — круговая частота внешнего электромагнитного поля, определяемая длиной волны падающего потока излучения; ш0 — круговая частота собственных колебаний свободных электронов атомов вещества, зависящая от их природы; (Ot — круговая частота собственных колебаний электронов поляризуемости; e, m — заряд и масса электрона соответственно; *N, Nk* — число атомов в единице объема, испытывающих поляризацию среды, соответствующее различным собственным частотам go, gk — коэффициенты сопротивления среды для частот, близких к «о и о^ соответственно.

Зная ю и а*, можно определить *глубину проникновения* 6 излучения в металлическую среду (так называемую *толщину скин-слоя* при нормальном скин-эффекте), пользуясь уравнением

$$/V$$

Величина 5 измеряется в единицах длины.

Расчет показателя преломления п для любой длины волны в пределах определенного интервала длин волн производится по дисперсионным формулам; эти формулы для различных классов материалов имеют схожее построение, но различаются обычно коэффициентами формулы дисперсии. Так, расчет *п* для воздуха в интервале длин волн в вакууме >i,=0,2^50 мкм выполняется по формуле дисперсии

$$1 = 1 + 64, c \qquad \frac{29498,ЫО-в}{146 — loeX-2"^} + \frac{255,4.10-е}{41 — ю п - г}$$

расчет *п* в интервале длин волн 0,365—1,0139 мкм для оптического бесцветного стекла производится по формуле дисперсии

$$+ Лг \quad + Аз \ X\text{-}2 + \quad + \quad X\text{-»} + Лв \ X\text{-}8,$$

где Аи .... Лб — коэффициенты формулы дисперсии, зависящие от марки стекла.

Средней дисперсией — п^ называют разность показателей преломления волн длиной и X^.

Основной средней дисперсией пр'—пс' называют разность показателей преломления для длин волн f и С (спектральные линии Фраунгофера 479,99 и 643,85 нм соответственно).

Коэффициентом дисперсии Vs называют отношение

$$V3 = («3 - 1) / («1 \sim «2),$$

где «1, И2, «3 — показатели преломления, соответствующие длинам волн 'hi,

Основным коэффициентом дисперсии VQCH называют отношение

$$^OCH = («oCH \sim 1) / («F' - «C').$$

Величины vs и VQCH — безразмерные

Термооптической постоянной Роои, К^', называют изменение основного показателя преломления при повышении температуры вещества на 1 К; Роси определяется выражением

$$Роси = Апоси/ДГ,$$

где Апоси — изменение основного показателя преломления; ДГ — изменение температуры, К.

Коротковолновой границей пропускания Xmm называют длину волны со стороны более коротких волн, при которой спектральный коэффициент внутреннего пропускания для толщины вещества 10 мм не ниже 0,50. Аналогично определяется *длинноволновая граница пропускания* Хтах, но для ДЛИННОВОЛНОВОЙ чэсти спектра. Amin и Ятах измеряют В единицах длины.

Коэффициент пропускания т представляет собой отношение потока излучения, прошедшего сквозь тело, к потоку излучения, упавшему на него.

Коэффициентом внутреннего пропускания т* называют отношение потока излучения, прошедшего к выходной поверхности среды, к потоку излучения, вошедшего в среду.

Коэффициентом отражения называют отношение потока излучения, отраженного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него<

Характер отражения света поверхностью данного вещества зависит от качества ее обработки. В общем случае отражение имеет характер *направленно-рассеянного* отражения, когда максимум силы отраженного света совпадает с направлением, соответствующим закону отражения. В зависимости от того, какая из составляющих отраженного потока (зеркальная или диффузная) превалирует, отражение рассматривается как зеркальное (коэффициент зеркального отражения р) или как диффузное (коэффициент диффузионного отражения Рдиф). Поверхности, для которых в отраженном потоке излучения преобладает диффузная составляющая, в той или иной степени приближаются к поверхностям, яркость которых не зависит от направления, а сила света убывает пропорционально косинусу угла между нормалью к поверхности и рассматриваемым направлением (равнояркостные, или ламбертовские поверхности).

Коэффициентом поглощения а называют отношение потока излучения, поглощенного данным телом, к потоку излучения, упавшему на него.

Величины т, т*. р и а — безразмерные. Связь между т, р и а устанавливается соотношением

$$T + p + \alpha = 1.$$

Для потока излучения длины волны А^соответствующие коэффициенты обозначают Р^ и а^ *(спектральные коэффициенты пропускания, внутреннего пропускания, отражения и поглощения).*

Значения т, т*. р и а зависят от спектрального состава падающего на тело потока излучения. В частном случае, если излучатель имитирует Солнце, то соответствующий коэффициент дополняется в индексе буквой S, например: коэффициент поглощения солнечного излучения as.

Показателем поглощения а называют величину, обратную расстоянию, на котором в результате поглощения в веществе поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в 10 раз. Для потока излучения с длиной волны Я соответствующую величину обозначают и называют *спектральным показателем поглощения.* Единицы величии а и ах — м-', мм-' и т. д.

Величины йх и X связаны соотношением

а величины с и т*, с^ " ^л — соотношениями

$$\tau^* = 10^{-"^}; \quad \backslash = 10 \quad ^^ ,$$

где *d* — толщина поглощающего слоя вещества, м, мм и т. д.

Для удобства сопоставления т^ различных веществ, оптически однородных в направлении распространения излучения, коэффициент внутреннего пропускания приводят обычно к единичной толщине поглощающего слоя. Расчетная формула для такого приведения имеет вид

где —спектральный коэффициент внутреннего пропускания для толщины поглощающего слоя, равной единице.

Коэффициенты т и т* связаны соотношением

$$\tau^* = \tau/(1-\rho)=\alpha$$

при одинаковых коэффициентах отражения на входной и выходной границах среды.

Оптической плотностью называют логарифм г.елнчны, обратной коэффициенту пропускания, т. е.

$$\pounds) = \lg(1/T) \text{ и } \lg(1/x^*).$$

Тогда

$$D^* = D + 21g(1 - p).$$

Если поток излучения проходит последовательно через среды с коэффициентом пропускания Tl, TJ, T3 ... и оптическими плотностями Z)i, *D^, D^...,* то для совокупности этих сред коэффициент пропускания т и суммарная оптическая плотность *D* вычисляются по формулам

$$\pounds) = D1 + D2 + D3 + \ldots$$

Зависимость р от угла падения Oi и показателей преломления *n'* и *n"* граничащих диэлектрических сред (излучение распространяется из среды с показателем преломления я' в среду с показателем преломления *n")* определяется выражением

$$^ \_ L \quad , \quad \frac{\operatorname{tg}^ (\alpha 1 - \alpha 2)}{}$$

где as — угол преломления.

Величины ai и а^ связаны законом преломления:

При нормальном падении

/ *n"* — и-

^ V +)

При нормальном падении потока излучения из воздуха на металлическую поверхность

P + •

Для оптически активных веществ дополнительно вводятся специфические характеристики, поясняемые ниже.

Показатель преломления обыкновенного луча По представляет собой отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме к фазовой скорости обыкновенного луча с длиной волны к в анизотропной среде.

Показателем преломления необыкновенного луча Пе называют отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме к фазовой скорости необыкновенного луча с длиной волны *X* в анизотропной среде. Если распространение необыкновенного луча рассматривается в направлении, перпендикулярном оптической оси анизотропной среды (одноосная анизотропия), или в направлении, перпендикулярном биссектрисе угла между оптическими осями (двухосная анизотропия), то Пе называют *главным показателем преломления необыкновенного луча* (ГПП).

Важной характеристикой анизотропных тел является *показатель двулучепреломления Ь.* представляющий собой разность между главным показателем преломления необыкновенного луча в анизотропной среде и показателем преломления обыкновенного луча, т. е.

Оптическим коэффициентом напряжения В. Па-' называют коэффициент пропорциональности между показателем двулучепреломления Ь, обусловленного механическими деформациями, и разностью главных нормальных напряжений 02—01, возникающих при этих де-

формациях, плоскости действия которых совпадают с плоскостями поляризации лучей е и о.

Если деформируемый образец уподобить одноосному кристаллу, а падающий параллельный пучок лучей направить перпендикуляр1ю сжимающей (растягивающей) силе, то зависимость между По—По и *Gs—Oi* принимает вид

$$Ne \text{ — } По = iS\ (Oa \text{ — } Oi).$$

Значение величины В для соответствующего вещества зависит от длины волны и температуры.

Для кристаллов низшей категории, оптическая индикатриса которых является трехосным эллипсоидом с тремя неравными единично-перпендикулярными осями, показатели преломления в направлении большой, средней и малой осей называют *большим (пс), средним (пт) И малым (пр) показателями преломления.*

Относительная степень поляризации Р ^^ представляет собой отношение разности интенсивностей пучков лучей с длиной волны я, поляризованных ортогонально, к их сумме. Величина Р ^ — безразмерная.

Углом полной поляризации (углом Брюстера) ав называют угол падения, при котором отраженный луч полностью поляризован перпендикулярно плоскости падения. Величина «е определяется выражением

$$Яо = aTctg((n''/n').$$

В частном случае, при я' = 1,

$$= \text{arctgn}".$$

Удельный угол вращения плоскости поляризации угл. град/мм, представляет собой угол, на который поворачивает плоскость поляризации образец кристалла толщиной 1 мм.

Угол вращения плоскости поляризации ip средой толщиной *d* (вдоль хода луча) определяется из выражения

Для описания веществ, являющихся в нормальных >словиях оптически изотропными, но при определенных ьнешних условиях становящихся анизотропными, служат специальные оптические характеристики.

Магнитооптической постоянной ВердеС^^ , угл. мин/(Тл-м), называют коэффициент пропорциональности между углом вращения плоскости поляризации ф, обусловленным наложением магнитного поля (вектор напряженности магнитного поля совпадает с направлением распространения оптического излучения в данной среде), и произведением напряженности внешнего магнитного поля Н на геометрическую длину пути I излучения в веществе.

Зависимость между ij и С^ имеет вид

Для соответствующего вещества *С* ^ зависит от длины волны и температуры.

Электрооптической постоянной Керра Вд^м/В^, называют коэффициент пропорциональности между показателем двулучепреломления *b* и произведением длины волны в вакууме л на напряженность *Е* внешнего электрического поля во второй степени, вектор напряженности которого перпендикуляреи направлению распространения излучения в данной среде

Зависимость между Ь и Вд имеет вид

$$b = \text{bxje}^{\wedge}$$

Значение Вх зависит от длины волны и температуры вещества.

Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) в кристаллах оценивают с помощью *электрооптических коэффициентов* связывающих поляризаци» онные характеристики веществ с напряженностью *Е* внешнего электрического поля. Индексы *i* и *k* соответствуют определенному углу между направлениями оптической оси кристалла и электрического поля. В случае параллельности этих направлений t=6 и к=Ъ, т. е. *Г1к = Гез.*

Максимальное искусственное двулучепреломление, образующееся при распространении света вдоль оси кристалла г, определяется выражением

$$г$$

где Ez — составляющая напряженности внешнего поля, параллельная направлению г.

При исследовании процессов теплообмена, вычислении температуры тел и других тепловых расчетах используются оптические характеристики, определяющие тепловое излучение тел.

Коэффициент теплового излучения ег — отношение энергетической светимости теплового излучателя Ме к энергетической светимости черного тела М^ при той же температуре в пределах пространственного угла 2л.

Спектральный коэффициент теплового излучения е^ — отношение спектральной плотности энергетической светимости теплового излучателя Ме^ к спектральной плотности энергетической светимости черного тела при той же температуре и той же длине волны в пределах пространственного угла 2я,

Величины е 7- и — безразмерные.

Расчетные формулы имеют вид

$$= \quad \{T^{\wedge} \text{ — } ;$$

где 0=5,6687-10-8 Вт/(м2-К^) — постоянная Стефана—Больцмана; *Т* — температура исследуемой излучающей поверхности, К: ^Ї — температура среды, находящейся в тепловом равновесии с исследуемой поверхностью. К; С,=3,7415-10-'® Вт м2; С2= 1,43880-10"^ м-К.

Единицы Ме и Ме^ — Вт/м^ и Вт/м3 соответственно.

В ряде случаев спектральную плотность энергетической светимости черного тела удобнее представить в виде функции частоты излучения v. В этом случае

$$= \quad ^{\wedge} \quad \exp$$

Связь между ег и е^ устанавливается соотноше-

В объектах новой техники коэффициент ег используется для расчетов процессов теплообмена совместно с коэффициентом поглощения as. В частности, при расчете температуры материалов и покрытий, облучаемых солнечным излучением, широко используют коэффициенты ег и *as.* В тех случаях, когда теплообменом в результате теплопроводности и конвекции можно пренебречь по сравнению с лучистым теплообменом, температура излучающей поверхности полностью определяется значениями ег и as и может быть вычислена по формуле

где Q —удельный тепловой поток солнечного излучения на границе земной атмосферы в направлении нормали к облучаемой поверхности (Q яг 1400 Вт/м^).

Если сравнивают энергетические светимости (или их спектральные плотности) реальных излучателей и черного тела не в пределах угла 2я, а в направлении нормали к излучающей поверхности, то коэффициенты излучения обозначают е^ и е^.

Более подробные сведения по рассмотренным выше вопросам можно найти в специальной литературе:

[1—6]—по измерениям в области новой техники;

[7—9] — по поляризационным материалам;

[10—13] — по различным видам оптических излучателей;

[14, 15] — по измерениям при высоких температурах;

[16] — по теории отражения света;

[17]—по оптическим свойствам металлов.

Следует рекомендовать также специальные справочники, содержащие дополнительные сведения по оптическим свойствам веществ, в частности [17—24]

В табл. 31.1—31.76 приведены оптические характеристики для различных материалов и веществ.

31.2. ОПТИЧЕСКИЕ СТЕКЛА

Таблица 31.1. Оптические характеристики кроновых стекол [25]

Характеристика	Марка стекла										
"осн •^осн	1,47214: 66,64	1,48460^ 66,17	1,518294 63,87	1,542136	1,548861 62,56	1,571309 55,77	1,574860 57,20	1,615506 60,33	1,615192 58,08	1, 56,43	,520270 58,71
я для длины волны лазера, нм:											
488,0	1,47521	1,48777	1,52181	1,54612	1,55268	1,57580	1,57926	1,61996	1,61983	1,62955	1,52413
514,0	1,47371		1,52009	1,54417	1,55081	1,57359	1,57710	1,61778	1,61756	1,62717	1,52224
520,8	1,47336		1,51968	1,54371	1,55037	1,57307	1,57659	1,61726	1,61702	1,62661	1,52179
530.0	1,47290		1,51916	1,54311	1,54979	1,57240	1,57593	1,61659	1,61633	1,62589	1,52121
568.2	1,47121	,48363	1,51722	1,54093	1,54770	1,56995	1,57353	1,61416	1,61379	1,62324	1,51910
632,8	,46897	,48131	1,51466	1,53807	1,54494	1,56676	1,57040	1,61096	1,61048	1,61979	1,51632
647.1	1,46855	,48088	1,51419	1,53755	1,54442	1,56618	1,56982	1,61037	1,60987	1,61916	1,51581
694.3	1,46732	,47960	1,51279	1,53600	1,54292	1,56448	1,56814	1,60864	1,60810	1,61732	1,51431
890,0	1,46371	,47585	1,50872	1,53170	1,53861	1,55974	1,56346	1,60375	1,60313	1,61219	1,51002
1060,0	1,46146	,47352	1,50625	1,52920	1,53604	!,55709	1,56081	1,60090	1,60032	1,60932	1,50748
?осн. 10-' 1/К, в интервале температур, К:											
от 213 до 293	- 2 2	+36	+ 6		+ 16	+ 19	+ 15	— 1,0	-|- 0,7	+ 2	+ 18,4
от 293 до 393	— 7	J-52	+21		4-32	+35	+30	+ 11,6	+ 15,8	+ 15	+34,0
<(X = 560 нм) для d, мм;											
10	0,993	0,991	0,996		0,995	0,996	0,995	0,996	0,996	0,996	0,996
100	0,932	0,917	0,958	0,958	0,956	0,957	0,953	0,958	0,962	0,957	0,959
Xniin, нм	321	318	320	322	325		318	346	347	347	327
В, 10-1^ Па-1, для X==0,55 мкм	3,70	3,45	3,20	2,60	2,80	2,90	2,70				2,90

. и далее значения этелей преломления приведены с погрешностью + I-Ю-^.

Таблица 31.2. Оптические характеристики флинтовых стекол [25]

	Марка стекла								
	1,629837	1,674385	1,638639	1,578326	1,616878	1,607015	1,652188	,723166	1,761712
*оси		47,00	36,50	41,03	36,69	37,68	33,62	29,29	27,32
n для длины волны лазера, им:									
488,0	63705	1,68073	1,64643	1,58457		1,61417		,73425	1,77426
514,0	63348	1,67761	1,64258	1,58149		1,61063		,728774	1,76802
520,8	63265	1,67688	1,64168	1,58076	61979	1,60980	65555	,72745	1,76657
530.0	63157	1,67593	1,64052	1,57983	61868	1,60873	65427	,72581	1,76470
568.2	62770	1,67250	1,63634	1,57647	61467	1,60489	64964	,71992	1,75806
632,8	62276	1,66809	1,63103	1,57215	60955	1,59998	64378	,71250	1,74971
647.1	62187	1,66728	1,63007	1,57137	60863	1,59910	64272	,71117	1,74822
694.3	61930	1,66496	1,62732	1,56912	60597	1,59655	63970	,70738	1,74397
890,0	61247	1,65864	1,62000	1,56303		1,58973	63172	,69751	1,73299
1060,0		1,65527	1,61623	1,55979		1,58616	62767	,69263	1.72765
Роен. 10"' К-1, в интервале температур. Кг									
от 213 до 293	+ 12,6	+ 6	+35	+25,4	+30,6	+30	+18,4	+49	+ 62,0
от 293 до 393	+30,5	+24	+56	+44,7	+52,5	+49	+42,4	+72	+89,0
ТКХ (X = 560НМ) для ий, мм:									
Ю	0,996	0,996	0,995	0,995	0,996	0,995	0,996	0,996	0,996
100	0,959	0,963	0,954	0,954	0,960	0,953	0,962	0,960	0,960
нм	347		364	335	346	343	355	372	
В, 10-«Па-1, для х = = 0,55 мкм	2,50		2,60	3,20	2,90	2,95	2,50	1,80	1,45

Таблица 31.3. Коэффициенты формулы дисперсии кроновых стекол [25]

	Марка Стекла				
	ЛК6	ЛК7	К8	БК8	БКЮ
4	2,1391711	2,1732195	2,2699804	2,3601309	2,4193499
4. 10-3	-9,8913489	—9,4960367	-9,8250605	-10,118581	-7,6662143
10-'	8,4704778	9,7105457	11,017203	11,761749	15,535897
А1, 10-«	2,8247761	1,0540599	0,76606834	2,4663544	—1,8549105
4, 10-5	—1,9072939	—0,38188276	1,1616952	-1,2819625	6,0646835
Л. 10-'	9,3359448	5,0116854	5,8130900	9,3405641	—27,567697

Продолжение табл. 31.3

АМ	Марка стекла				
	ТК2	Тки	ГК16	ТК20	КФ4
Л	2,4321820	2,5615496	2,559113	2,5854315	2,2723952
L 10-3	-8,2232823	—10,649249	-9,8827859	—9,0796080	-9,3640165
10-3	14,772427	14,719854	14,212686	Ш,291552	11,794006
л, *10-**	—0,17487909	1,6374569	5,9116562	1,7763493	1,7956625
10-5	3,4620141	0,77935463	—5,4050675	0,85249807	120,49614
Л. 10-'	-14,790076	-1,1965516	32,017380	0,25484363	3,8219544

; помощью коэффициентов формулы дисперсии обеспечивает погрешность в определении *n.* не

Таблица 31.4. Коэффициенты формулы дисперсии флинтовых стекол [25]

	Марка стекла			
	БФ12	БФ16	БФ24	ЛФ5
А	2,5767076	2,7308360	2,6051551	2,4246429
Лг, 10-3	—7,6835879	-9,2896392	-10,884034	—7,9511272
Аз, 10-«	22,692139	21,405060	20,201021	19,033590
	4,1937275	2,3934677	17,331740	3,9095360
Ав, 10-«	2,4633519	2,7482465	-14,260022	1,0184703
Ае, 10-'	17,499673	2,8808684	108,42795	17,896964

Продолжение табл. 31.4

	Марка стекла				
	Ф1	Фв	ТФ1	ТФ3	ТФ5
Ai	2,5344898	2,5047749	2,6349371	2,8433701	2,9580175
А2, 10-»	—8,9233727	—7,8584593	—8,5077204	—8,5219322	—8,2686725
А3, 10-3	22,149725	22,129689	26,185673	33,994123	39,383391
Л4, 10-«	6,9286357	4,2000253	7,5510993	12,311168	12,219807
А, 10-®	-0,0061831815	2,3483839	1,5001867	—1,4893638	3,1433368
Ае, 10-'	30,937650	18,712023	36,330948	93,877638	86,507903

коэффициентов формулы дисперсии обеспечивает погрешность в определении

Таблица 31.5. Границы и спектральные коэффициенты внутреннего пропускания кварцевых стекол [25]

Характеристика	Марка стекла				
	КУ1	КУ2	КБ	кв-р	КИ
Xmin, НМ	180	180	230	220	240
W , НМ	2600	2200	2200	2200	2800
τ* (d = 10 мм) для X, им:					
180	0,850	0,490			
190	0,885	0,615			
200	0,900	0,745			
210	0,930	0,860	0,030	0,260	0,075
220	0,960	0,930	0,220	0,550	0,220
230	0,960	0,925	0,565	0,800	0,435
240	0,950	0,905	0,540	0,800	0,525
250	0,970	0,920	0,715	0,865	0,585
260	0,999	0,975	0,920	0,940	0,800
270	0,999	0,995	0,995	0,965	0,930
280	0,999	0,999	0,999	0,985	0,975
300-2000	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
2200	0,915	0,915	0,915	0,915	0,999
2400	0,980	–			0,999
2600	0,800	–			0,999
2700	0,070	–			0,999
2800		–	—	—	0,999

Таблица 31.6. Показатели преломления, основной коэффициент дисперсии, коэффициенты формулы дисперсии и оптический коэффициент напряжения кварцевых стекол КУ», КУ2, КВ, КВ-Р, КИ [25]

Характеристика	Численное значение
«осн	1,460078
•осн	68,00
И ДЛЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ лазера, им:	
488,0	1,46299
514,0	1,46157
520,8	1,46123
530,0	1,46079
568,2	1,45918
632,8	1,45702
647,1	1,45662
694,3	1,45543
890 0	1,45190
1060!0	1,44968
Л,	2,1026513
10-3	—8,5943075
Аз, 10-3	9,8576238
Л4, 10-4	—4,4538022
Л5, 10-S	4,4589827
10-6	-1,9692608
В, 10-« Па-1, для X = = 0,55 мкм	3,45

31.7. Оптические характеристики стекол для волоконной оптики и ситаллов [25]

Характеристика	Стекла для сердцевины				Стекла для оболочки		Ситаллы		
	ТК16	ФВ	ВС586	ВС682	В0488	В0513	С021	С0115	С0156
"оси	1,6152	1,6291	1,5893	1,6855	1,4898	1,5150	1,553	1,535	1,545
	1050	1757	1422	1298	745	795	1080	1020	1040
Xmin, нм	323	334	332	325	300	310	-	–	–
tx(d=10ММ) ДЛЯ Х. нм:									
400	0,992	0,996	0,997	0,992	0,997	0,994	—	–	—
600	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	–	–	–
800	0,997	0,999	0,999	0,999	0,999	0,997	–	–	–
1000	0,991	0,999	0,999	0,999	0,999	0,997			

Таблиц! 31.8. Значения спектрального коэффициента диффузного отражения р^ ^^^ светорассеиваюших оптических материалов при температуре 295—300 К [26]

нм	Молочное стекло				Окись магния		Сульфат бария (прессованный порошок BaSO°)
	МС И		МС 20		копоть MgO	прессованный порошок MgO	
	зеркально полированное	–	зеркально полированное	матсиое			
400	0,915	0,892	0,935	0,950	0,977	0,972	0,987
420	–	–	0,940	0,950	–		
440			0,945	0,957			
450	0,945	0,925			0,980	0,980	
460		–	0,955	0,960	0,980		0,991
480	–	–	0,960	0,966	0,980	–	
490					0,980		
500	0,958	0,942	0,965		0,980	0,783	0,991
520		–	0,970	0^974	0,980		
540		–	0,970	0,975	0,980		
550	0,956	0,945	0,970	0,975	0,980	0,984	
560	0,956	0,945	0,970	0,975	0,980		0,992
570	0,956	0,945	0,970	0,975	0,980		0,992
580	0,956	0,945	0,970	0,975	0,980		0,992
600	0,955	0,945	0,970	0,973	0,980	0,988	0,992
620	0,955	0,945	0,970	0,974	0,980		0,992
6^0	0,955	0,945	0,965	0,973	0,979		0,992
650	0,955	0,945	0,965	0,975	0,979	0,990	0,992
660	0,955	0,945	0,965	0,975	0,978	0,990	0,992
680	0,955	0,945	0,965	0,971	0,978	0,990	0,992
700	0,955	0,945	0,965	0,970	0,977	0,990	0,992
720	0,955	0,945	0,965	0,971	0,977		0,992
740	0,955	0,945	0,965	0,971	0,976		0,992
750	0,955	0,945	0,960		0,975		0,992
1000			0,935				0,990

Примечание! Погрешность ± 1%.

Таблица 31.9. Спектральный показатель поглощения и показатель преломления цветного стекла различных марок [27]

ах , мм-', для стекол марок

X, нм	УФС1	УФС6	ФС6	СС2	СС4	СЗС7	СЗС22	СЗС24	зсп	ЖЗС6	ЖЗС12	ЖЗС17	0С5	иксе	НС1	НС2	НС8	нею	тею
240	0,32	>3	—	>3	>3	>3	>3	—	—	>3	>3	>3	>3	—	>3	>3	>3	>3	>3
280	0,025	1,74	0.57	2,73	>3	>3	>3	0,40	-	>3	>3	>3	>3	-	>3	>3	>3	>3	>3
320	0,004	0,13	0,084	0,15	0,68	0,75	>3	0,041	-	1,05	>3	>3	1,77	-	0,95	>3	>3	>3	>3
350	0,005	0,035	0,032	0,040	0,16	0,086	0,49	0,009	-	>3	>3	>3	1,24	-	0,10	0,29	0,75	2,30	0,41
380	0,035	0,104	0,023	0.015	0,050	0,026	0,046	0,004	4,80	>3	>3	>3	1,17	-	0,011	0,080	0.44	1,32	0,15
420	0,72	>3	0,082	0,010	0,055	0,011	0,009	0,011	1,95	1,21	>3	>3	1,16	-	0,050	0,14	0,29	0,93	0,43
450	1,07	>3	0,30	0,025	0,15	0,009	0,007	0,011	0,77	0,49	2,33	>3	0,90	-	0,081	0,29	0,27	0,87	0,67
480	1,33	>3	0,95	0,079	0,49	0,010	0,007	0,009	0,33	0,18	1,27	2,32	0,61	-	0,073	0,24	0,26	0,85	0,52
520	2,30	>3	1,75	0,24	1,34	0,034	0,028	0,010	0,15	0,056	0,66	1,50	0,36	-	0,071	0,23	0.27	0,87	0,39
550	2,50	>3	1,55	0,22	1,27	0,079	0,12	0,010	0,21	0,038	0,62	1,43	0,23	-	0,070	0,22	0.26	0,85	0,37
580	3,50	>3	2,20	0,33	1,86	0,15	0,37	0,013	0,42	0,050	0,80	1,55	0,15	-	0,072	0,23	0.27	0,88	0,31
620	3,00	>3	3,10	0,37	2,10	0,28	1,09	0,028	0,84	0,094	1,35	2,13	0,10	-	0,079	0,25	0.27	0,87	0,33
650	1,75	>3	3,40	0,38	2,10	0,39	1,99	0,047	1,12	0,11	1,66	2,43	0,080	5,70	0,076	0,25	0,27	0,86	0,29
680	0,36	2,92	2,70	0,18	1,01	0,48	>3	0,072	1,29	0,092	1,69	2,18	0,070	4,90	0,043	0,13	0,26	0,81	0,15
720	0,080	0,41	0.43	0,009	0,049	0,57	>3	0,12	1,41	0,070	1,69	1,88	0,063	3,70	0,030	0,070	0,25	0,73	0,10
750	0,11	0,30	0.067	-	0,008	0,61	>3	0,16	1,42	0,050	1,63	1,79	0,060	2,75	0,020	0.060	0,26	0,74	0,12
780	0,15	0,47	0,014	-	0,005	0,62	>3	0,22	1,43	0,029	1,59	1,87	0,060	2,00	0,024	0,065	0,29	0,79	0,12
840	0,22	0,78	0,014	-	0,008	0,60	>3	0,34	1,39	0,014	1,52	1,84	0,060	0,99	0,038	0,095	0,35	0,87	0,21
920	0,26	0,94	0,029	0,002	0,016	0,50	>3	0,54	1,22	0,010	1,38	1,64	0,060	0,32	0,044	0,11	0,42	0,98	0,26
1000	0,23	0,99	0.064	0,005	0,037	0.39	>3	0,75	0,99	0,010	1,20	1,48	0,060	0,11	0,050	0.12	0,49	1,10	0,28
1200	0,40	1,51	0,38	0,050	0,27	0,21	>3	0,96	0,50	0,010	0,73	0,96	0,056	0,022	0,040	0.13	0,51	1,06	0,27
1400	0,49	1,41	0,55	0,047	0,36	0,11	2,05	1,01	0,41	0,010	0,44	0,60	0,050	0,017	0,040	0.10	0.36	0,71	0,20
1800	0,43	1.58	0,53	0,043	0,37	0,028	0,45	0,70	0,22	0,010	0,22	0,42	0,032	0,009	0,040	0,090	0,24	0,46	0,18
2460	0,23	1,84	0,17	-	0,048	0,006	0,15	0,68	0,080	0,010	0,16	0,35	0,030	0,013	0,040	0,080	0,15	0,26	0,15
3000	1,10	0,53	0,37	0,13	0,24	0,11	1,93	0,77	0,11	0,11	0,21	0,55	0,15	0,090	0,13	0,22	0,62	0,63	0.23
и для ^.=589,29 нм	1,540	1,520	1,495	1,520	1,520	1,514	1,535	1,516	1,550	1,522	1,527	1,527	1,523	1,541	1,521	1,523	1,503	1,509	1,523

31.3. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ, МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.10. Показатели преломления исландского шпата при температуре 291 К [28]

X, нм	%	n^ (ГПП)
200	1,90284	1,57649
312	1,71425	1,51140
410	1,68014	1,49640
434	**1,67552**	1,49430
467	**1,67024**	1,49190
486	1,66785	1,49074
508	1,66527	1,48956
533	1,66277	1,48841
560	1,66046	1,48736
589	1,65835	1,48640
643	1,65504	1,48490
656	1,65437	1,48459
670	1,65367	1,48426
768	1,64974	1,48259
801	1,64869	1,48216
905	1,64578	1,48098
946	1,64480	1,48060
1042	1,64276	1,47985
1097	1,64167	1,47948
1159	1,64051	1,47910
1229	1,63926	1,47870

Таблица 31.11. Показатели преломления кристаллического кварца при температуре 291 К [21]

X. нм	*"о*	% (ГПП)
214	1,63039	1,64262
250	1,60032	1,61139
303	1,57695	1,58720
340	1,56747	1,57738
405	1,55716	1,56671
436	1,55379	1,56322
468	1,55103	1,56037
480	1,55012	1,55943
509	1,54823	1,55747
589	1,54425	1,55335
628	1,54282	1,55188
656	1,54190	1,55093
707	1,54049	1,54947
766	1,53907	1,54801
845	1,53752	1,54640
1000	1,53503	1,54381
1080	1,53387	1,54260
1400	1,52972	1,53826
1530	1,52800	1,53646
1600	1,52703	1,53545
1800	1,52413	1,53242
2172	1,51799	1,52609

Таблица 31.12. Удельный угол вращения плоскости поляризации кристаллического кварца при температуре 293 К [29]

нм	Фо. град/мм	*X.* нм	Фо. град/мм
215	236,0	486	32,76
279	114,5	500	**30,78**
405	48,90	518	**28,62**
434	41,92	589	21,72
448	39,24	656	17,25

Таблица 31.13. Оптические характеристики бесцветной слюды (мусковит) при температуре 291 К [29]

X. мкм	*"о*		*"р*	«с (d=0,03 мм)
0,589	1,594	1,590	1,561	
1,0	1,593	1,586	1,554	0,98
1,5	1,586	1,579	1,548	0,92
2,0	1,575	1,572	1,544	0,98
2,5	1,562	1,562	1,535	0,90
3,0	—	—	—	0,95

Таблица 31.14. Относительная степень поляризации и спектральный коэффициент пропускания поляроидов [29]

Толщина анизотропной пленки в поляроидах 0,2 мм; погрешность измерения ±5 %

X, нм	Герапатитовый поляроид		Поливиниловый поляроид	
	Р, , %		р , , %	•х
400		0,02	100	0,26
450		0,15	100	0,37
500	98.7	0,27	100	0,40
550	99,0	0,32	100	0,37
600	99,0	0,34	100	0,35
650	98,5	0,36	100	0,38
700	98,2	0,36	100	0,42
750	91,5	0,40	100	0,45
800	67.8	0,44	98	0,50
850	41,2	0,50	72	0,59
900	28,2	0,54	32	0,80

Таблица 31.15. Показатели пре. натриевой селитры [29]

	«0	% (ГПП)
0,434	1,6126	1,3404
	1,5998	1,3384
O!501	1,5968	1,3379
0,546	1,5899	1,3365
0,578	1,5860	1,3363
0,589	1,5848	1,3360
0,656	1,5791	1,3347
0,668	1,5783	1,3345

Таблица 31.16. Постоянная Верде магнитооптических материалов при температуре от 293 до 300 К [13]

Материал	λ, нм	10⁻⁴ угл. мин/(Тл м)
Арсенид галлия	1060	0,30
Бензин	589,3	0,297
	486,0	0,0190
	589,3	0,0131
Железо-иттриевый гранат	632,8	85
	1000-2000	300
Йодистый литий	632,8	0,0823
Кварц кристаллический (⊥c)	589,3	0,0166
Кварц плавленый	437	0,0283
	486	0,0223
	548	0,0172
	633	0,0130
Кремний	1300	0,10
Сернистый кадмий	632,8	0,33
СернистыЙ цинк	666,0	0,234
Сероуглерод	486,0	0,0670
	589,3	0,0420
Спирт метиловый	589,3	0,00944
Спирт этиловый	589,3	0,0111
Стекло бескислородное:		
ИКС22	1150	0,087
	3390	0,005
ИКС23	1150	0,052
	3390	0,006
ИКС24	1150	0,120
	3390	0,005
ИКС25	1150	0,135
	3390	0,010
ИКС26	1150	0,066
	3390	0,006
ИКС28	1150	0,095
	3390	0,015
ИКС29	1150	0,097
	3390	0,011
ИКСЗО	1150	0,085
	3390	0,014
ИКС31	1150	0,100
	3390	0,009
ИКС32	3390	0,014
Стекло	1100	0,065
А5-8(20%TeOг)		
Стекло Ge3+ - P⁵»	500	-0,326
Стекло PbSi	632	0,053
	700	0,071
	1000	0,032
Стекло Ртз+	670	-0,243
Стекло оптическое бесцветное:		
ЛК7	589	0,016
К8	589	0,017
БК6	589	0,019
БК8	589	0,018
БКЮ		0,020
ТК2		0,019
ТКИ	589	0,018
ТК16	589	0,019
ТК20		0,020
КФ4		0,019
БФ12		0,034
БФ16		0,026
БФ24		0,039
ЛФ5		0,032
ФI	589	0,038
Ф6	589	0,037

Продолжение табл. 31.55

Материал	λ, нм	10⁻⁴ угл. мин/(Тл м)
ТФ1	589	0,044
Сурьмянистый индий	15 000	12
Фторид европия	600	-1,0

Для левовращающих материалов $C^{\wedge} < 0$.

Таблица 31.17. Постоянная Керра жидких и газообразных электрооптических материалов [30]

Вещество	λ, нм	Т, К	$B^{\wedge}$, «/в»
Азот	546	330	4,44-10-"
Бензол	546	293	5,56-10-15
Вода	546	293	5,55-10-"
Карбосульфид парообраз-	546	293	4,0-10-18
Монобромнафталин	639	293	ь о ы о - и
Нитробензол жидкий	500	293	5,5-10-12
То же	525	293	5,2-10-«
	550	293	5,0-10-w
	575	293	4,5-10-и
	600	293	4,3-10-«
	625	293	4,1-10-12
	650	293	4,0-10-12
	675	293	3,7-10-1-^
	700	293	3,6-10-«
	750	293	3,5-10-12
	800	293	3,4-10-12
Нитробензол парообраз- ный	546	330	3,0-10-"
Нитротолуол	639	293	1,4-10-«
Сероуглерод	546	293	3,89-10-"
Сероуглерод парообраз- ный	546	293	4,0-10-1'
Хлорбензол	546	293	1,11-10-13

Таблица 31.18. Электрооптический коэффициент и показатель преломления кристаллических электрооптических материалов при температуре 293 К и длине волны 546 нм [31]

Материал	$10^{-\Gamma_{41}}$, м/В	"o	n^ (ГПП)
Дигидроарсенат калия	10,9	1,520	1,570
Дигидроарсенат рубидия	13,0	1,520	1,560
Дигидрофосфат аммония	5,5	1,526	1,480
Дигидрофосфат калия	9,7	1,510	1,468
Дидейтерофосфат аммония	8,0	1,519	1,476
Дидейтерофосфат калия	26,4	1,510	1,470

Таблица 31.19. Спектральный коэффициент пропускания дигидрофосфата аммония толщиной 1 мм при температуре 293 К [32]

λ, нм	τ	λ, нм	τ
200	0,62		0,95
300	0,77	900	0,94
400	0,83	1000	0,90
500	0,88	1100	0,80
600	0,92	1200	0,60
700	0,95	1300	0,20

Таблица 31.20. Спектральный коэффициент внутреннего пропускания оптических кристаллов толщиной 1 мм при температуре 293 К для луча обыкновенного

Образцы — полированные диски. Погрешность измерения ± 5%

	AgCi [21]	• Tu"	BaR,	CaFs [21]	Csl [33]	CuBr [21]	cuci [21]	Ge [21]	KBr [34]	KCl [2i]	KRS-5 [35]		NaCl [19]	NaF [21]
1,0		0,870	0,996	0,997	0,984		0,878		0,991	0,995	0,819	0,919	0,940	
2,0	0,944	0,900	0,996	0,994	0,984	0,885	0,932	0,548	0,991	0,995	0,841	0,919	0,950	
3,0	0,949	0,910	**0,9Э6**	0,993	0,984	0,914	0,932	0,700	0,991	0,994	0,846	0,926	0,950	
4,0	0,952	0,870	0,996	0,991	0,981	0,914	0,939	0,707	0,991	0,991	0,846	0,933	0,940	
5,0	0,954	0,770	0,996	0,991	0,981	0,914	0,939	0,714	0,991	0,992	0,846	0,940	0,590	
6,0	0,956	0,520	0,996	0,993	0,981	0,914	0,939	0,714	0,992	0,992	0,846	0,864	0,520	
7,0	0,956	0,500	0,996	0,990	0,981	0,914	0,939	0,707	0,992	0,993	0,846	0,753		
8,0	**0,956**	–	**0,994**	0,975	0,979	**0,914**	0,939	0,707	**0,992**	**0,994**	0,846	0,634		0,960
9,0	**0,956**	–	0,993	0,930	0,979	0,914	0,939	0,700	0,992	0,994	0,852	–		0,950
10,0	**0,956**		0,987		0,979	0,914	**0,939**	0,693	0,992	0,995	0,852			0,930
11,0	0,953		0,987		0,977	0,914	0,939	0,678	0,993	0,995	0,852			0,870
12,0	**0,956**	—	0,903	–	0,977	0,914	**o',936**	0,671	0,993	0,995	0,852	-	–	0,780

Сапфир.

Таблица 31.21. Показатель преломления n^ луча обыкновенного для оптических кристаллос при температуре 293 К [37]

i. HM	AgCl	AbO, (сапфир)	BaF.	CaF.	Csl	Ge	KBr	к а	KRS-S	LiF	NaCl	NaF
199,0				1,4964						1,4402		
340,4	–	–	–	1,4477	—		1,6172	1,M71		1,4036	1,5861	
404,7	–	–	–	1,4415	–	—	1,5899	1,5100	–	1,3985	1,5666	—
486,1			–	1,4370			1,5719	1,4982		1,3948	1,5533	
589,3		1,56780	–	1,4338			1,5600	1,4902		1,3920	1,5442	
656,3	–	–	–	1,4325			1,5552	1,4870		1,3908	1,5405	
766,5	–	—	–	1,4309	–		1,5502	1,4835		1,3893	1,5366	1,32305
863,0	–	–	–	1,4299	–		1,5472	1,4815		1,3883	1,5343	
1000	2,02239	1,75660	1,4686	1,4289	1,7576	–	1,5445	1,4799	2,4474	1,3872	1,5322	1,32174
1060 [38]	–	–	1,4681	1,4285	–	–	1,5430	–		1,3866		1,3210
1200	2,01582		1,4675	1,4278	1,7530		1,5421	1,4779	2,4258	1,3856	1,5302	1,3205
1500	2,01047	1,74650	1,4663	1,4263	1,7494		1,5399	1,4769	2,4089	1,3832	1,5284	1,3189
2000	2,00615	1,73753	1,4647	1,4239	1,7465	4,116	1,5383	1,4754	2,3962	1,3788	1,5268	1,3170
2500	2,00386	–	1,4630	1,4211	1,7451	4,072	1,5374	1,4745	2,3903	1,3733	1,5255	1,3155
3000	2,00230	–	1,4612	1,4179	1,7444	4,045	1,5368	1,4736	2,3869	1,3666	1,5244	1,3133
4000	1,99983	1,62675	1,4570	1,4097	1,7434		1,5357	1,4721	2,3841	1,3495	1,5220	1,3085
5000	1,99745	–	1,4511	1,3990	1,7427		1,5345	1,4704	2,3810	1,3267	1,5190	1,3015
6000	1,99483	–	1,4441	1,3856	1,7421		1,5332	1,4684	2,3791	1,2975	1,5155	1,2930
8000	1,98847	–	1,4259	1,3499	1,7409		1,5302	1,4633	2,3757		1,5066	1,2705
10000	1,98034	–	1,4014	–	1,7395	4,0025	1,5264	1,4570	2,3719		1,4949	1,2380
10 600 [38]	–	–	1,3900	–	–	4,0020	1,5250	–		**1,0500**		1,2200
12000	1,97026				1,7378	4,0018	1,5217	1,4480	2,3673		1,4801	1,1820
15000	1,95113	–			1,7347	4,0014	1,5129	**1,4320**	2,3592		1,4515	
20000	1,90688	–			1,7280		1,4926	**1,3998**	2,3417			
25000	–	–	–	–	1,7192	–	1,4642	–	2,3186	–	–	–
30 000	–	–	–		1,7077				2,2896			
40 000					**1,6785**				**2,2113**			
50000												

Таблица 31.22. Спектральный коэффициент пропускания оптической керамики толщиной 1 мм при температуре 293 К [20]
Погрешность измерения ± 5%

л, мкм	для керамики на основе					
	А1А	CdTe	MgF,	ZnS	ZnSe	У,Оз[39]
1				0,73		
2	0,17	0^5	0,90	0,92	0,28	0,42
3	0,24	0,43	0,92	0,93	0,34	0,45
4	0,29	0,55	0,95	0,93	0,43	0,49
5	0,34	0,46	0,92	0,93	0,53	0,53
6	0,29	0,47	0,94	0,93	0,57	0,51

Продолжение табл. 31Л

Л.МК.	"N для керамики на основе					
	А1Л	CdTe	MgF,	ZnS	ZnSe	У,Оз[39]
7	0,068	0,48	0,88	0,93	0,55	0,43
8	0,022		0,44	0,93	0,54	0,29
9			0,20	0,93	0,53	0,13
10			–	0,91	0,54	0,022
11			–	0,89	0,54	–
12			–	0,87	0,51	–
13	–	–	–	0,83	0,50	–
14				0,73	0,50	

31.5. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.23. Коэффициент теплового излучения промышленных эмалей при 293 К [40]
Образцы в виде слоев эмали на металлической подложке. Погрешность измерения ± 7 %

		при облучении эмали от черного						гретого до температуры, К		
						1750	2000	2250		
Автоэмаль синтетическая № (вишневая)		0,20	0,17	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05
	30	0,25	0,22	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10
	60	0,38	0,34	0,29	0,25	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17
	100	0,47	0,43	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,27	0,26	0,26
Автоэмаль синтетическая № 835 (синяя)		0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05
		0,17	0,15	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10
		0,28	0,25	0,24	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18
		0,38	0,36	0,35	0,34	0,33	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27
		0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17
	30	0,24	0,23	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22
	60	0,37	0,36	0,35	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	
	100	0,46	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,43	0,42	0,41	0,40
МЧ-13 (электрик)		0,23	0,20	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	30	0,30	0,27	0,24	0,21	0,20	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17
	60	0,45	0,40	0,35	0,32	0,30	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28
	100	0,55	0,48	0,45	0,41	0,40	0,38	0,37	0,37	0,37	0,36
МЧ-13 (вишневая)	20	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
	30	0,21	0,19	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15
	60	0,33	0,30	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
	100	0,41	0,40	0,39		0,38	0,38	0,39		0,39	0,39
ФСХ № 15 (голубая)		0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
		0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
		0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
	100	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
ФСХ № 26 (красно-коричневая)	20	0,05	0,12	0,14	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10
	30	0,10	0,15	0,20	0,21	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13
	60	0,15	0,25	0,30	0,32	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23	0,22
	100	0,22	0,32	0,38	0,40	0,38	0,36	0,34	0,33	0,32	0,30

Таблица 31.24. Коэффициент поглощения солиечнсго излучения терморегулирующих однослойных покрытий при температуре 293—300 К

Погрешность измерения ± 7 %

Тип покрытия	"s	Литература	Тип покрытия	"s	Литература
Грунтовка мелкозернистая на магниевой подложке	**0,94**	**[41]**	**КО-990 на дуралюминиевой подложке**	**0,31**	**[44]**
Диоксид титана:			**КО-990 на медной подложке**	**0,28**	**44**
белый	**0,19**	**[41]**	**КЛ-990 на стальной подложке**	**0,66**	**[44]**
серый	**0,87**	**[41]**	**УР-231 на дуралюминиевой подложке**	**0,34**	**[44]**
Краска:			**УР-231 на медной подложке**	**0,31**	**44**
алюминиевая на окисленной алюминиевой подложке	**0,42**	**[41]**	**УР-231 на стальной подложке**	**0,69**	**44**
белая акриловая	**0,26**	**[42]**	**ФБР-74Д на дуралюминиевой подложке**	**0,38**	**44**
белая неорганическая	**0,13**	**41**	**ФБР-74Д на медной подложке**	**0,34**	**[44]**
черная глянцевая	**0,98**	**43**	**ФБР-74Д на стальной подложке**	**0,68**	**44**
черная матовая Minnesota 3M	**0,99**	**41**	**Э-4100 на дуралюминиевой подложке**	**0,46**	**44**
черная матовая Catalac Thermofo-	**0,96**	**44**	**Э-4100 на медной подложке**	**0,41**	**44**
Лак:			**Э-4100 на стальной подложке**	**0,67**	**44**
КО-815 на дуралюминиевой подложке	**0,40**	**[44]**	**Эмаль белая фарфоровая**	**0,30**	**41**
КО-815 на медной подложке	**0,30**				
КО-815 на стальной подложке	**0,67**				

Таблица 31.25. Коэффициент теплового излучения пигментов [45]

Погрешность измерения ±7

Цвет	Основа пигмента	в при температуре, К	
		117	293
Белый	**Al_2O_3**	**0,94**	**0,95**
Белый	**CaO**	**0,94**	**0,94**
Белый	**$MgCO_3$**	**0,91**	**0,95**
Белый	**MgO**	**0,91**	**0,94**
Белый	**$PbCO_3$**	**0,93**	**0,90**
Белый	**ThOa**	**0,90**	**0,90**
Белый	**Y_2O_3**	**0,90**	**0,89**

Продолжение табл. 31.25

Цвет	Основа пигмента	при температуре, К	
		117	293
Белый	**ZnO**	**0,95**	**0,95**
Белый	**ZrOa**	**0,95**	**0,95**
Желтый	**PbO**	**0,90**	0,80
Желтый	**$PbCrO_4$**	**0,93**	**0,96**
Зеленый	**Cr_2O_3**	**0,92**	**0,93**
Красный	**Fe_2O_3**	**0,91**	**0,94**
Синий		**0,94**	**0,90**
Черный		**0,96**	

31.6. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Таблица 31.26. Спектральный коэффициент теплового излучения легких металлов

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 10 %

Металл	*T*, К	при 1, мкм						
		2	3	4	6	8	10	12
Алюминий	**400**	**0,050**	**0,041**	**0,035**	**0,028**	**0,025**	**0,021**	**0,019**
	500	**0,054**	**0,045**	**0,038**	**0,032**	**0,027**	**0,024**	**0,021**
	600	**0,060**	**0,050**	**0,044**	**0,035**	**0,030**	**0,026**	**0,024**
	700	**0,065**	**0,055**	**0,047**	**0,038**	**0,033**	**0,029**	**0,025**
	800	**0,070**	**0,057**	**0,049**	**0,042**	**0,036**	**0,032**	**0,029**
	900	**0,074**	**0,061**	**0,053**	**0,043**	**0,038**	**0,034**	**0,031**
Магний	**400**	**0,063**	**0,052**	**0,044**	**0,036**	**0,031**	**0,027**	**0,024**
	500	**0,071**	**0,058**	**0,050**	**0,040**	**0,035**	**0,030**	**0,028**
	600	**0,085**	**0,066**	**0,056**	**0,045**	**0,038**	**0,034**	**0,032**
	700	–	**0,070**	**0,060**	**0,048**	**0,042**	**0,037**	**0,035**
	800		**0,076**	**0,065**	**0,053**	**0,045**	**0,040**	**0,037**
	900	—	**0,080**	**0,069**	**0,056**	**0,048**	**0,043**	**0,040**

Таблица 31.27. Коэффициент теплового излучения алюминия [20]
Образцы полированные. Погрешность измерения ± 10%

к 1 V	т. к	V Цг. К		Т. к	
50 0,0080	90	0,010	200 0,018	500	0,039
60 0,0085	100	0,011	250 0,021	600	0,046
70 0,0090	120	0,012	300 0,025	700	0,054 [19]
80 0,0095	150	0,013	400 0,032	800	0,062 [19]

Таблица 31.28. Спектральный коэффициент отражения пленок алюминия при температуре от 291 до 295 К [20]
Пленки получены испарением при давлении 1,33-10-' Па на стеклянные подложки. Угол падения потока излучения 0°. Погрешность измерения ± 2%

X, нм				h
300	0,80	650	0,82	1100 0,93
400	0,93	700	0,85	1200 0,90
500	0,93	800	0,82	3000 0,91
600	0,90	900	0,84	4000 0,92
		1000	0,90	

Таблица 31.29 Спектральный коэффициент теплового излучения тугоплавких металлов [18]
Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 10%

Металл	т. к	ε при X, мкм											
		0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Ванадий [20]	300									0,16	0,12	0,090	0,080
Вольфрам	1200	0,486	0,482	0,474	0,461	0,446	0,428	0,408	0,386	0,186	0,112	0,086	0,078
	1600	0,480	0,479	0,466	0,451	0,436	0,418	0,399	0,378	0,204	0,134	0,108	0,098
	2000	0,474	0,470	0,459	0,441	0,426	0,408	0,390	0,371	0,222	0,157	0,130	0,117
	2600	0,465	0,461	0,447	0,426	0,411	0,394	0,376	0,360	0,248	0,191	0,163	0,146
Молибден	1000	—	0,458	0,438	0,417	0,394	0,367	0,333	0,302	0,106	0,063	0,046	0,035
	1200	—	0,448	0,429	0,410	0,389	0,363	0,333	0,306	0,130	0,081	0,061	0,049
	1600	–	0,432	0,415	0,397	0,378	0,358	0,333	0,312	0,165	0,108	0,068	0,084
	2000	–	0,419	0,403	0,387	0,370	0,352	0,333	0,317	0,191	0,133	0,084	0,068
Ниобий	1600	—	—	—	—	—	—	—	—	0,175	0,151	0,126	0,110
	1800	—	—	—	—	—	—	—	—	0,190	0,170	0,145	0,125
	2000	–	—	–	—	—	—	-	-	0,205	0,177	0,155	0,135
Рений	1810								0,360	0,260	—	—	—
	2388								0,362	0,275			
	3045								0,365	0,285	-	–	-
Тантал	1200	—	0,525	0,510	0,473	0,421	0,363	0,304	0,262	0,148	0,123	0,108	—
	1600		0,516	0,495	0,458	0,412	0,361	0,316	0,281	0,172	0,145	0,128	
	2000		0,507	0,480	0,444	0,405	0,362	0,327	0,299	0,196	0,167	0,148	
	2400	–	0,498	0,464	0,432	0,399	0,366	0,338	0,317	0,220	0,190	о; 168	–
Титан [24]	300	-	-	-	-	-	-	-	–	0,35	0,29	0,23	0,18
Хром [24]	293	0,47	0,40	0,40	0,40	0,43	0,41	0.40	0,40	0,24	0,20	0,21	0.17

Таблипа 31.30. Коэффициент теплового излучения Е^ тугоплавких металлов
Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 10%

Т. к	V [19]	W [47]	Hf [19]	Мо [181	Nb [18]	Re [18]	Та [18]	Ti [19]	с- [19	Zr [19]
1000	0,145	0,105			0,116	0,164	0,132	0,227	0,353	
1100	0,161	0,128		0,105	0,127	0,173	0,141	0,239	0,360	0,204
1200	0,176	0,133	0,284	0,117	6,138	0,181	0,149	0,251	0,372	0,214
1400	0,201	0,164	0,294	0,142	0,158	0,201	0,168	0,274		0,232
1600	0,222	0,195	0,304	0,166	0,178	0,225	0,186	0,297		0,248

Продолжение табл. 31. 55

г. к	V[191	W [47]	Ш [19]	MO [18]	Nb [18]	Re [18]	Та [18]	Ti [19]	Cr [19]	Zr [19]
1800	0,24!	0,223	0,314	0,192	0,195	0,245	0,205	0,316	—	0,261
2000	0,257	0,249	0,324	0,214	0,212	0,264	0,224	—	–	0,272
2200		0,269	—	0,234	0,228	0,282	0,242	–	–	–
2400		0,287	—	0,254	0,244	0,296	0,259	—	–	–
2600		0,302	—.	0,269	–	0,309	0,274	—	–	–
2800		0,314		0,282		0,318	0,288	—	–	—
3000		0,325	—	–	–	–	0,300	–	–	–
3400	–	0,345	–	–	–	–	–	–	—	–

Таблица 31.31. Спектральный коэффициент теплового излучения цветных металлов и их сплавов [46]
Образцы нихрома зачищенные; образцы других материалов полированные. Погрешность измерения ± 10%

Материал	*m*, к	E° при X, мкм						
		2	3	4	6	«	10	12
Броиза	273	0,057	0,049	0,043	0,035	0,031	0,029	0,027
	293	0,059	0,051	0,045	0,037	0,033	0,031	0,029
	400	0,070	0,057	0,050	0,041	0,035	0,032	0,029
	600	0,086	0,070	0,062	0,052	0,045	0,040	0,037
	800	0,099	0,082	0,073	0,058	0,051	0,047	0,042
	1000	0,11	0,092	0,080	0,065	0,056	0,052	0,049
	1400	0,13	0,11	0,093	0,078	0,067	0,060	0,056
Кобальт	400	0,074	0,063	0,055	0,044	0,037	0,033	0,030
	500	0,085	0,072	0,062	0,052	0,044	0,039	0,036
	600	0,094	0,080	0,070	0,057	0,050	0,045	0,040
	800	0,11	0,094	0,082	0,067	0,057	0,053	0,048
	1000	0,13	0,11	0,093	0,076	0,066	0,059	0,055
	1400	0,15	0,13	0,11	0,090	0,078	0,071	0,065
	1800	0,17	0,14	0,13	0,10	0,090	0,080	0,074
Константан [20J	293	0,16	0.Л4	0,12	0.098	0,085	0,076	0,070
Манганин [20]	293	0,16	0,13	0,11	0,093	0,080	0,072	0,065
Me№	400	0,040	0,033	0,027	0,022	0,019	0,017	0,015
	500	0,044	0,037	0,032	0,025	0,022	0,019	0,017
	600	0,048	0,040	0,035	0,028	0,024	0,021	0,019
	800	0,057	0,047	0,040	0,034	0,029	0,025	0,023
	1000	0,064	0,053	0,046	0,037	0,033	0,029	0,027
	1200	0,070	0,059	0,050	0,041	0,035	0,032	0,029
Никель	400	0,083	0,069	0,060	0,048	0,042	0,038	0,034
	500	0,095	0,079	0,069	0,056	0,048	0,043	0,040
	600	0,11	0,088	0,077	0,063	0,054	0,048	0,044
	800	0,12	0,10	0,090	0,074	0,065	0,057	0,053
	1000	0,14	0,12	0,10	0,084	0,073	0,066	0,060
	1400	0,17	0,14	0,12	0,10	0,088	0,078	0,073
	1600	0,18	0,15	0,13	0,11	0,094	0,084	0,077
Нихром	400	0,23	0,19	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10
	600	0,24	0,20	0,18	0,14	0,13	0,11	0,10
	800	0,25	0,21	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11
	1200	0,26	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,12
	1600	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12

Таблица **31.32. Спектральный коэффициент отражения меди и никеля при температуре 291—295 К [28]**

Образцы полированные. Угол падения потока излучения 0°. Погрешность измерения d=5%

	Р)		*К* нм	Р;		*Т. к*							
	Си	N i		Си	Ni		*Со*	Си	Ni		Со	Си	Ni
300	0,250	0,440	1000	0,901	0,725	200		0,023		900	0,157	0,054	0,132
500	0,440	0,612	1100	0,903	0,730	300		0,024	0,068	1000	0,175	0,058	0,144
589	0,705		1200	0,905	0,740	400	—	0,027	0,078	1100	0,205	0,061	0,156
600	0,720	0,650	2000	0,955	0,835	500	–	0,031	0,088	1200	0,225		0,168
700	0,830	0,695	3000	–	0,884	600	—	0,036	0,099	1300	–		0,179
800	0,890	0,705	4000	0,973	0,918	700	0,125	0,043	0,110	1400	–		0,188
900	0,890	0,710	5000	0,968	0,940	800	0,148	0,050	0,120	1500	–	—	0,196
			10 000	–	0,955								

Таблица 31.33. Коэффициент теплового излучения кобальта, меди и никеля [19]

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 7%

31.34. Спектральный коэффициент теплового излучения благородных металлов [46]

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 10%

Металл	Г, К	*е"* при),, мкм						
		2	3	4	6	8	10	12
Золото	400	0,046	0,037	0,032	0,027	0,023	0,020	0,018
	600	0,056	0,047	0,040	0,032	0,027	0,025	0,022
	800	0,065	0,054	0,046	0,038	0,033	0,029	0,027
	1000	0,073	0,060	0,052	0,042	0,036	0,033	0,030
	1200	0,078	0,066	0,057	0,047	0,040	0,036	0,033
Иридий	400	0,072	0,060	0,052	0,042	0,037	0,033	0,030
	600	0,088	0,075	0,065	0,053	0,045	0,041	0,037
	800	0,10	0,085	0,074	0,060	0,052	0,047	0,043
	1000	0,11	0,094	0,082	0,067	0,058	0,053	0,048
	1200	0,12	0,10	0,089	0,074	0,064	0,057	0,053
	1600	0,14	0,12	0,10	0,085	0,074	0,066	0,061
	2000	0,16	0,13	0,11	0,095	0,082	0,074	0,067
	2400	0,17	0,14	0,12	0,10	0,090	0,081	0,075
	2800		0,15	0,14	0,11	0,096	0,087	0,080
Палладий	400	0,095	0,078	0,069	0,057	0,048	0,042	0,039
	600	0,11	0,095	0,083	0,072	0,060	0,052	0,050
	800	0,13	0,11	0,095	0,082	0,069	0,062	0,057
	1000	0,15	0,12	0,11	0,095	0,077	0,068	0,063
	1400	0,17	0,14	0,12	0,11	0,090	0,080	0,075
	1800	–	0,16	0,14	0,12	0,10	0,091	0,085
	2200	—	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,093
Платина	400	0,091	0,075	0,067	0,055	0,049	0,042	0,039
	600	0,11	0,093	0,081	0,068	0,059	0,053	0,047
	800	0,13	0,11	0,093	0,077	0,069	0,061	0,057
	1000	0,15	0,12	0,11	0,086	0,075	0,070	0,063
	1400	0,17	0,14	0,12	0,10	0,088	0,079	0,071
	1800	–	0,16	0,14	0,11	0,10	0,090	0,081
	2000		0,17	0,15	0,12	0,11	0,095	0,087
Родий **[20]**	293	0,10	0,080	0,060	0,042	0,040	0,040	0,040
Серебро **[20]**	293	0,025	0,020	0,020	0,020	0,020	0,015	0,013

Таблица 31.35. Коэффициент теплового излучения tj. благородных металлов [18]

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 7 %

т. к	Аи	Ir[18]	Pd	pt	Rh	Ag
200	0,020					0,016
300	0,025	0,040	0,030	0,032	0,019	0,019
400	0,029	–	–	–	–	0,022
600	0,038					0,029

Продолжение табл. 31. 55

т. к	Аи	Ir [18]	Pd	Pt	№	Ae
800	0,047					0,036
1000	0,056	0,210	0,100	0,128	0,084	0,043
1200	0,065	0,215	0,135	0,149	0,112	–
1400		0,216	0,162	0,167	0,133	–
1600		0,218	0,179	0,183	0,150	
1800		0,220		0,196	0,163	–
2000	—	0,228	–	–	0,178	–
2200	–	0,230	–	–	0,183	–

Таблица 31.36. Спектральный коэффициент пропускания и отражения пленок золота различной толщины при температуре от 291 до 295 К [48]

Пленки получены испарением при давлении 1,33 • iQ-s Па на кварцевые полированные подложки. Погрешность измерения ± *2%.* Угол падения потока излучения 0°.

Толщина пленки, ны	X, им											
	253,6	275,3	296,7	334,1	361,0	404,6	435,8	480,0	508,5	546,1	578.0	643.8
5	0,590	0,583	0,596	0,619	0,635	0,652	0,667	0,690	0,689	0,660	0,618	0,542
10	0,444	0,427	0,438	0,468	0,485	0,506	0,533	0,589	0,616	0,597	0,558	0,454
20	0,238	0,230	0,265	0,274	0,295	0,320	0,349	0,424	0,464	0,433	0,378	0,290
30	0,128	0,121	0,130	0,163	0,180	0,201	0,226	0,293	0,317	0,270	0,226	0,153
40	0,066	0,066	0,072	0,097	0,112	0,130	0,152	0,207	0,220	0,170	0,133	0,084
50	0,033	0,033	0,039	0,057	0,072	0,086	0,104	0,151	0,155	0,111	0,082	0,049
60	0,019	0,019	0,023	0,036	0,046	0,057	0,072	0,107	0,109	0,072	0,053	0,031
70	0,010	0,012	0,014	0,024	0,033	0,042	0,053	0,079	0,081	0,051	0,035	o,o2:r
85	0,010	0,012	0,011	0,018	0,025	0,033	0,041	0,065	0,064	0,037	0,026	0,015
95	0,010	0,010	0,010	0,015	0,021	0,027	0,034	0,054	0,053	0,031	0,021	0,012

Продолжение табл. 31.36

Толщина	P, пр(1)„ нм											
	253.6	275.3	296,7	334.1	361.0	104,6	435.8	480,0	508,5	546,1	Ъ78,0	643.8
5	0,130	0,135	0,133	0,126	0,129	0,122	0,117	0,109	0,108	0,120	0,139	0,172
10	0,207	0,210	0,207	0,195	0,190	0,181	0,167	0,145	0,145	0,172	0,205	0,273
20	0,272	0,303	0,301	0,289	0,285	0,278	0,259	0,223	0,231	0,300	0,366	0,478
30	0,300	0,323	0,330	0,329	0,335	0,333	0,321	0,286	0,315	0,418	0,493	0,593
40		0,301	0,316	0,322	0,342	0,352	0,345	0,324	0,369	0,489	0,567	0,660
50	0^253	0,279	0,274	0,294	0,331	0,349	0,346	0,338	0,402	0,530	0,605	0,683
60	0,232	0,259	0,265	0,276	0,320	0,339	0,339	0,338	0,414	0,550	0,622	0,674
70	0,223	0,255	0,261	0,264	0,306	0,320	0,328	0,333	0,422	0,557	0,623	0,675
85	0,218	0,248	0,ЖО	0,253	0,294	0,315	0,322	0,332	0,426	0,569	0,627	0,668
95	0,212	0,248	0,249	0,243	0,256	0,302	0,308	0,327	0,431	0,580	0,629	0,679

Таблица 31.37. Спектральный коэффициент отражения пленок серебра при температуре от 291 до 295 К [20]

Пленки получены испарением при давлении 1,33.10-3 Па на кварцевые полированные подложки. Угол падения 'потока излучения 0°. Погрешность измерения ± 2%

X, нм	1	•с нм	Px	X, им	Px
251	0,340	338	0,555	500	0,913
288	0,212	357	0,744	589	0,950
305	0,091	385	0,814	700	0,960
316	0,042	420	0,866	1000	0,970
326	0,146 1	450	0,905	1100	0,975

Таблица 31.38. Спектральный коэффициент отражения пленок палладия и родия при температуре от 291 до 295 К [20]

Пленки получены испарением при давлении 1,33-1О-sпа на стеклянные подложки. Угол падения потока

X, нм	1				Px	
	Pd	Kb	1t - "		Pd	Rh
200	0,25	-	1	800	0,70	0,82
300	0,43	0,67		900	0,70	0,83
400	0,55	0,75		1000	0,70	0,84
500	0,63	0,78		1100	0,71	0,85
600	0,67	0,80		1200	0,72	0,85
700	0,68	0,81		2000	–	0,91

Таблица 31.39. Спектральный коэффициент теплового излучения легкоплавких металлов [46]

Ртуть — очищенная. Образцы других металлов — полированные, неокисленные. Погрешность измерения

Металл	T, К	$\varepsilon^{n}_{\lambda}$ при λ, мкм						
		2	3	4	6	8	10	12
Олово	293	0,083	0,068	0,059	0,049	0,040	0,036	0,031
	400	0,098	0,080	0,070	0,057	0,050	0,045	0,041
	500	—	0,090	0,080	0,065	0,057	0,050	0,047
Ртуть	273—293	—	0,17	0,16	0,13	0,11	0,10	0,090
Свинец	293	0,11	0,090	0,080	0,065	0,057	0,051	0,048
	400	0,13	0,11	0,093	0,078	0,067	0,061	0,007
	600	0,16	0,13	0,12	0,096	0,084	0,077	0,069
Сурьма	293	0,095	0,079	0,069	0,055	0,047	0,041	0,039
	400	0,11	0,090	0,080	0,066	0,057	0,050	0,046
	500	0,12	0,10	0,088	0,073	0,062	0,055	0,050
	600	0,13	0,11	0,095	0,078	0,070	0,060	0,055
	700	0,14	0,12	0,10	0,084	0,075	0,066	0,060
	800	0,15	0,12	0,11	0,089	0,078	0,072	0,065
	900	0,16	0,13	0,11	0,095	0,084	0,076	0,070
Цинк [24]	293	0,051	0,045	0,043	0,039	0,039	0,038	0,037
	500	0,061	0,053	0,050	0,043	0,043	0,043	0,042
	700	0,072	0,060	0,055	0,049	0,047	0,046	0,045

Таблица 31.40. Коэффициент теплового излучения черных металлов

Погрешность измерения ±10%

Материал	Состояние излучающей поверхности	T, К	
Железо [19]	**Полированная**	**200**	**0,081**
		300	**0,101**
		500	**0,139**
		700	**0,177**
		900	**0,216**
		1100	**0,254**
Сталь:			
мягкая углеродистая [20]	**Полированная**	**290**	**0,10**
низкоуглеродистая [20]		**300**	**0,10**
20Х23Н18 [19]	**Окисленная**	**300**	**0,47**
12Х18Н9Т [19]	**Электрополированная**	**290—300**	**0,13**
1Х18Н10Т	**»**	**400**	**0,16**
		800	
		1200	**О!37**
	Полированная пастой ГОИ	**293**	**0,19**

Продолжение табл. 31. 55

Материал	Состояние излучающей поверхности	T, К	$\varepsilon_{т}$
	Шлифованная порошками М7-М40	**293**	**0,26-0,31**
07Х16Н6	**Полированная**	**300**	**0,15**
	Окисленная	**300**	**0,70**
		900	**0,85**
	»	**1100**	**0,87**
08Х18Н12Б	**Зеркально полированная**	**290**	**0,19**
		300	**0,20**
Чугун [19]	**Полированная**	**473**	**0,21**
	Полированная, окисленная при 873 К	**f 473**	**0,64**
		1 873	**0,78**
	Шероховатая, окисленная при 1073 К	**523**	**0,95**

Таблица 31.41. Коэффициент теплового излучения и поглощения солнечного излучения терморегулирующих покрытий из чередующихся слоев металлов и диэлектриков [20]

Погрешность измерения ± 7%

Тип покрытия	Материал подложки		ε_s
CeOr—Mo-CeOr	**Молибден**	**0,06**	**0,90**
CeOr—Mo—CeOr	Слой алюминия на стекле	**0,07**	**0,90**
CeOr—Mo-CeOr	**Сталь 12Х18Н10Т**	**0,18**	**0,85**
Mo-CeOr	**Слой алюминия на стекле**	**0.06**	**0.90**
Mo—SiOz	**То же**	**0,06**	**0,90**
Ni-SiO^-Ni-SiO,	**Стекло**	**0,10**	**0,92**
SiO—Al—SiO	**»**	**0,08**	**0,89**
SiO^-Mo-SiO^	**Молибден**	**0.08**	**0,85**
SiOa—Mo—SiO^	**Слой алюминия на стекле**	**0,08**	**0,85**
SiOa—Mo-SiO^	**Сталь 12Х18Н10Т**	**0,15**	**0,85**
ZnS—Al—ZnS	**Стекло**	**0,16**	
ZnS—Cu—ZnS	***Л***	**0.11**	–
ZnS-Ni-ZnS		**0,06**	**0,85**

31.7. ГРАФИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.42. Спектральный коэффициент отражения ρ^ и спектральные коэффициенты теплового излучения Е, графитов

	Углеграфит при К [49]	Электрографит*2 при Г-1460 К [50]	Реакторный графит 1860Т[50Г
0,5	0,14	0,86	0,87
1,0	0,16	0,83	0,84
1.5	0,18	0,87	0,87
2,0	0,19	0,87	0,90
2,5	0,21	0,85	0,90
3,0	0,22	0,85	
3,5	0,23	0,82	
1,0	0,25	0,83	
4,5		0,82	O',85
5,0	–	0,85	

•^Образцы компактные, обожженные. Погрешность измере-

*5"Об˙разцы тру^атые. Поверхность неокисленная. Погреш-

лица 31.43. Коэффициенты теплового излучения спектральные коэффициенты теплового излучения графитов (> =0,65 4-0,66 мкм)

	I S It					
400	0,74					
	0,76					
	0,76					
1000	0,77		0,87	0,91	0,86	0,84
1200	0,77	0,76	0,86	0,90	0,84	0,82
1400	0,78	0,78	0,86	0,88	0,82	0,80
1600	0,78	0,79	0,86	0,86	0,80	0,79
1800	0,78	0,80	0,86	0,85	0,78	0,77
2000	0,78	0,89	0,86	0,84	0,76	0,76
2200	O, 78		0,86	0,83		
2400	0,78		0,86	0,81		
2600			0,85	0,80		
2800			0,84	0,79		

Образцы компактные, обожженные. Погрешность измерения ±10%.

Образцы цилиндрические: поверхность полированная, не-Окисленная . Погрешность измерения + 6—10%.

Образцы трубчатые. Поверхность пористая, неокисленная; d= 1700 кг/м® при 293 К- Погрешность измерения + 10—12%.

Образцы трубчатые. Поверхность неокисленная. Погрешность измерения ± 10%.

Таблица 31.44. Спектральный коэффициент отражения пиролитического графита при температуре 293 К [49]

	fj^ при высоте неровностей на отражающей поверхности, мкм			
	5-7.5	0.70-1,75	1-1,5	0,1
400	0,190	0,145	0,089	0,075
665	0,210	0,160	0,092	0,080
700	0,215	0,165	0,093	0,082

Таблица 31.45. Спектральный коэффициент ej теплового излучения углепластика и стеклоуглерода при температуре от 291 до 293 К [52]

Погрешность измерения + 8%

X, мкм	Углепластик КУПВМ, шероховатый	Стеклоуглерод СУ-2500, полированный
0,63	0,92	0,81
1,15	0,79	0,73
3,39	0,72	0,66
10,6	0,79	0,50

31.46. Коэффициент теплового излучения Еу. различных видов сажи [201

Погрешность измерения ±10%

Т. К	Вид сажи					
	i i i 1	1 1	| Е | i i	к 1 ч	к 1 б	к 1 1
90		0,930	0,960			
100		0,925	0,958	—	—	—
120	0,790	0,920	0,955	—	–	0,760
140	0,785	—	0,955	—	–	0,805
160	0,777	–	0,954	–	–	0,820
180	0,768		0,953			0,835
200	0,765		0,953		0,950	0,845
220	0,764		0,952		0,950	0,865
240	0,763		0,951		0,951	0,902
260	0,762		0,951	0,942	0,951	0,920
280	0,761		0,950	0,944	0,952	0,940
300	0,760	–	0,950	0,948	0,952	0,960

31.8. ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.47. Оптические характеристики органических стекол [30]

Характеристика	Метилметакрилат	Полистирол	Полихлорстирол
П ДЛЯ X, нм:			
404,7	1,5049	1,6271	1,6507
486,1	1,49628	1,60574	1,62833
589,3	1,49029	1,59194	1,61400
656,3	1,4878	1,58655	1,60838
1000	1,4815	1,5738	1,5957
р, 10-S 1/К, для X=589,3 им	-16	–	—11

Таблица 31.48. Спектральный коэффициент внутреннего пропускания τ_{i} полимерных материалов толщиной 1 м» при температуре 293 К [20]

Образцы — полированные диски. Погрешность измерений ± 10%

	Ацетилцеллю-	Ацетобутират-целлюлоза белая	Полиамид ПК-4	Поликарбонат [53]	Полиме-крнлат	Политрифторхлор этилен	Полиэтилентерефталат ПЭТФ	Теф^	Этилцеллюлоза
0,40	0,0081-0,041	0,0185	0,208	0,563	—		0,0345	—	0,0081-0,041
0,50	0,0081-0,041	0,0206	0,208	0,723	–	0,843	0,0179	–	0,0081-0,041
0,60	0,0081-0,041	0,0206	0,208	0,723	–	–	0,0179	–	0,0081-0,041
0,70	0,0081-0,041	0,0206	0,249	0,706	—	—	0,0345	—	0,0081-0,041
0,80		—	–	0,672	—	–	–	–	—
1,0					0,364	0,936	–	–	
1,5					0,364	0,940	–	–	
2,0		—			0,364	0,947	–	0,0134	
3,0				–	0,130	0,834	–	0,0625	—
4,0	—			–	0,218	0,464	–	0,0081	–
5,0	–	–	–	–	0,364	0,604	—	0,0625	—

Таблица 31.49. Оптические характеристики пластифицированного и непластифицированного органического стекла [23]

Т, К	X, мкм	Пластифицированное стекло марки СОЛ		Непластифицированное стекло марки	
		п	•"xi	"	!
291	0,300		0,11	—	—
291	0,320		0,53	—	
291	0,340		0,76	—	0,11
291	0,360	–	0,86	—	0,85
291	0,380	–	0,88	—	0,89
291	0,400	–	0,89	—	0,90
294	0,589	1,492	0,89	1,489	0,85
318	0,589	1,488	0,90	1,486	0,84
333	0,589	1,486	0,90	1,484	0,84
291	0,750	–	0,92	–	0,80
291	0,800	–	0,90	–	0,92
291	1,00		0,90		0,92
291	1,20		0,61		0,90
291	1,40	–	0,60		0,60
291	1,60	–	0,70	–	0,69
291	2,00		0,47		0,45

Таблица 31.50. Показатель преломления полимерных материалов при 291—293 К для длины волны 589,1 нм [55]

Материал		Материал	
Аминопласт	1,55-1,62	Стирол	1,61 — 1,67
Ацетилцеллюлоза	1,47-1,50	Фенолформальдегид	1,54-1,70
Винилацетат	1,473	Формальдегид	1,57-1,65
Винилхлорид	1,52-1,53	крезольный кислый	
		Целлулоид	1,495—1,520
Метакрилат	1,50-1,52		
Метилметакрилат	1,49		
Полидихлорстирол	1,61		
Полистирол	1,59—1,61		

Таблица 31.51. Спектральный коэффициент внутреннего пропускания $\tau^{\wedge}$ полимерных материалов, подвергаемых ультрафиолетовому облучению [20]

Облучение имитирует воздействие заатмосферного солнечного излучения длительностью 100 ч. Образцы — полированные пластины толщиной 30 мкм. Измерения при температуре 293 К- Погрешность измерений ± 5%

X, мкм	Поликарбонат		Полиэ тилентерефталат	
	до облучения	после облучения	до облучения	после облучения
0,40	0,87	0,63	0,84	0,28
0,45	0,87	0,68	0,85	0,32
0,50	0,88	0,70	0,86	0,38
0,60	0,89	0,76	0,87	0,50
0,70	0,90	0,79	0,87	0,57
0,80	0,90	0,83	0,88	0,62
1,0	0,90	0,84	0,89	0,66

31.9 СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31. 52. Коэффициент поглощения солнечного излучения для строительных материалов [20]

Измерения при температуре от 290 до 300 К. Погрешность измерении ± 10%

Материал	"s	Материал	"s
Алебастр	0,31	красками:	
Асбоцемент:		белой	0,35
серый	0,66	зеленой	0,59
белый	0,41	голубой	0,48
Асбошифер	0,75	темно-зеленой	0,74
Бетон:		покрашенный цементными красками:	
неокрашенный	0,55	голубой	0,67
покрашенный силикатными		розовой	0,56

Продолжение табл. 31. 55

Материал	"s	Материал	"s	Материал		Материал	"s
светло-зеленой	0,66	Кирпич:		Фарфор	0,52	клеевая	0,40
темно-зеленой	0,68	белый	0,33	Фибролит цемент-	0,79	розовая	0,52
Гипс неполирован-	0,25	красный	0,48	ный		светло-голубая	0,53
ный		Мипора чистая белая	0,16	Черепица:		Штукатурка:	
Древесноволокнис-	0,68	Мрамор:		коричневая	0,74	светло-желтая	0,48
тая плита бес-		белый	0,42	красная	0,67	силикатная	0,78
цветная, без от-		темный	0,68	Штукатурка:		темно-серая	0,75
делки		Рубероид	0,93	известковая	0,50	цементная сос-	
.Древесностружеч	0,43	Стекловолокно	0,56	известковая бе-	0,30	тава:	
ная плита экс-		Стеклоткань	0,42	лая		1 :3	0,66
струкционная						1 :5	0,64

Таблица 31.53. Спектральный коэффициент отражения строительных материалов при температуре 293 К [20| Погрешность измерений ±10%

Материал	для л. мкм									
	0,50	0,75	1,0	2,0	3.0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
Бетон:											
Неокрашенный	0,37	0,43	0,42	0,30	0,05	0,06	0,07	0,07	0,32	0,16	0,19
ркрашенный цементной голубой крас-	0,36	0,41	0,51								
окрашенный цементной зеленой крас-	0,26	0,28	0,43								–
кой											
Древесноволокнистые плиты:											
напрессованные поливинилхлоридной пленкой	0,08	0,11	0,25			–	–	-	-	–	-
окрашенные белой эмалью	0,71	0,72	0,75								
Песок сухой очищенный			0,40	0,50	0,54						
Фарфор:											
глазурованный	0,43		0,30	0,25	0,16	0,15	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05
неглазурованный	0,53		0,38	0,33		0,24	0,08	0,08	0,05	0,10	0,50
Шамот белый	0,92		0,95	0,90	0^40	0,62	0,25	0,12	0,08	0,16	0,42
Штукатурка гипсовая	0,82	0,85	0,84	0,52	0,08	0,37	0,25	0,12	0,17	0,08	0,06

Таблица 31.54. Коэффициент теплового излучения строительных материалов [55]

Материал	Г, к	^m 1	Материал	т. к	4
Асбест	293	0,96	**Мрамор серый полированный**	293	0,932
Асбошифер	293	0,96	**Рубероид**	293	0,93
Асфальт	298-303	0,95	**Стекло оконное:**		
Бетон-	293	0,92	гладкое	298—303	0,91
Гипс неполированный	293	0,903	матовое	293	0,96
Глина обожженная	303	0,91	**Толь кровельный**	293	0,91-0,93
Дерево строганое	293	0,8-0,9	**Цемент**	300	0,54
Древесные опилки (хвойные)	298—303	0,96	**Штукатурка шероховатая из-**	283—363	0,91
Кирпич:			**вестковая**		
красный неполированный	293	0,932			
огнеупорный	773-1273	0,65-0,75			
шамотный	293	0,85			
	1273	0,75			
	1503	0,59			

1.10. оксиды, БОРИДЫ, КАРБИДЫ И НИТРИДЫ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Таблица 31 55. Коэффициент теплового излучения E_j тугоплавких оксидов [51]

Погрешность измерений ± 10%

т. к	AUO,	MgO	ZrO,
1200	0,35	0,33	
1300	0,36	0,28	0,39
1400	0,37	0,28	0,42

Продолжение табл. 31. 55

Т. к		MgO	ZrO^
1500	0,38	0,30	0,45
1600	0,39	0,34	0,47
1700	0,40	0,38	0,48
1800	—	0,43	0,49

Таблица 31.56. Коэффициент теплового излучения боридов, карбидов и итридов тугоплавких и редкоземельных металлов [18]

Погрешность измерений ±10%

Материал	ε_m при температуре, К									
	1100	1300	1500	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900
Борид:										
гадолиния	0,61	0,62	0,62	0,63	0,64	–	–	–	–	–
гафния	0,85	0,87	0,89	0,92	0,94	–	–	–	–	–
иттрия	0,63	0,65	0,66	0,67	0,68	–	–	–	–	–
лантана	0,68	0,69	0,69	0,70	0,71	–	–	–	–	–
неодима	0,56	0,56	0,58	0,58	0,59	–	–	–	–	–
самария	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	–	–	–	–	–
циркония	0,86	0,88	0,91	0,91	0,95	–	–	–	–	–
Карбид:										
" бора	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	–	–	–	–	–
вольфрама	–	--	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	
ниобия	0,41	0,42	0,43	0,45	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48
тантала	–	–	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	–
титана	0,85	0,86	0,87	0,87	0,89					
циркония	–	0,81	0,79	0,77	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64
Нитрид бора	0,58	0,59	0,60	0,60	0,60	–	–	–	–	–

Таблица **31.57. Спектральный коэффициент теплового излучения оксидов металлов и сплавов для длины волны 0,65 мкм [56]**

Образцы — диски с гладкой окисленной поверхностью. Погрешность измерений **10—15%**

Окисленный материал		Окнсленный материал	
Алюмель	0,87	Сталь:	
Алюминий	0,30	нержавеющая	0,80
Бериллий	0,35	углеродистая	0,85
Ванадий	0,70	Титан	0,50
Железо	0,70	Торий	0,50
Иттрий	0,60	Уран	0,30
Кобальт	0,75	Хром	0,70
Константан	0,84	Хромель:	
Магний	0,20	90 Ni — 10 Cr	0,87
Медь	0,70	80 Ni - 20 Cr	0,90
Никель	0,90	60Ni-24Fe- 16Cr	0,83
Ниобий	0,70	Цирконий	0,40
		Чугун	0,70

1.11. ЗЕМНЫЕ ПОКРОВЫ И ПРИРОДНЫЕ МИНЕРАЛЫ

Таблица 31.58. **Спектральный коэффициент отражения р, различных почв [19]**

Х.„км	Глина жирная	Земля			Песок желтый
		желтая	коричне-вая	красная	
0,4	0,08	0,08	0,08	0,06	0,15
0,5	0,12	0,18	0,12	0,07	0,27
0,6	0,17	0,32	0,17	0,18	0,36
0,7	0,20	0,53	0,20	0,28	0,44
0,8	0,18	0,67	0,21	0,30	0,50
0,9	0,17	0,76	0,23	0,33	0,54
1,0	0,20	0,81	0,20		0,58

прим. средние

ляют 0,15 и 0,7 соответственно.

Таблица 31.59. **Спектральный коэффициент отражения р^ различных видов растительности [19]**

	Листва			Солома	Трава	
		сухая желтая	сухая коричневая		свежая	сухая
0,4	0,10	0,04	0,04	0,10	0,04	0,10
0,5	0,21	0,08	0,08	0,20	0,08	0,18
0,6	0,32	0,22	0,15	0,27	0,19	0,27
0,7	0,40	0,37	0,23	0,33	0,20	0,30
0,8	0,49	0,43	0,38	0,38	0,50	0,35
0,9	0,55	0,48	0,52	0,44	0,69	0,40
1,0	0,58	0,50	0,60	0,48	0,76	0,43

П р I ! среднее значение Рj^ в диапазоне длин 1

Таблица 31.60. **Показатель преломления природных драгоценных и полудрагоценных камней для длины волны 589,3 им [54]**

Материал	"о		
Алмаз белый	2,417		0,044
Берилл	1,571-1,599	1,566—1,590	
Изумруд	1,588-1,595	1,581-1,588	0,014
Сапфир:			
белый	1,768-1,771	1.759—1,761	
зеленый	1,770-1,779	1,762-1,770	0,018
рубиновый	1,768—1,778	1.760-1,769	
Турмалин	1,669	1,638	0,017
Хрусталь горный	1,544	1,553	0,013
Материал	***Пр***	**"т**	**«С**
Бирюза		1,62	1,65
Малахит		1,66	1,91
Топаз	1,630	1,631	1,638

Приведены значения для л −687,0 MKN

Таблица 31.61. **Показатель преломления белого алмаза в видимой области спектра** [54]

ны	«	нм	«
400	2,465	600	2,416
450	2,446	650	2,411
500	2,433	700	2,407
550	2,423	750	2,404

31.12. ЛУННЫЕ ГРУНТЫ

Таблица 31.62. **Коэффициент теплового излучения лунного грунта из района Моря Изобилия [58]**

Образцы с насыпной плотностью 1900 кг/м^; поверхность насыпки сглажена. Погрешность измерений ± 1%

Т. К		*Т.* К	
90	0,9764	200	0,9743
120	0,9763		
160	0,9758	240	0,9706
		270	0,9660
		300	0,9603

Таблица 31.63. **Спектральный коэффициент теплового излучения лунного грунта из района МчЈЯ Изобилия [58]**

Образцы с насыпной плотностью, кг/м": I — 1400; II — 1600-1700; III - 1900; поверхность насыпки сглажена

Л. ыкм				**Х.мкм**			
	1[58]	II	III		1158]	II	111
2,5	**0,82**	**0,78**	**0,73**	**10**	**0,97**	**0,97**	**0,97**
4,0	**0,77**	**0,75**	**0,72**	**12**	**0,97**	**0,97**	**0,97**
6,0	**0,98**	**0,86**	**0,84**	**14**	**0,98**	**0,98**	**0,98**
8,0	**0,97**	**0,97**	**0,97**				

Таблица 31.64. **Спектральный коэффициент диффузного отражения р^ реголита различных районов Луны при температуре от** 293 до 300 К [60]

Образцы в виде мелкозернистого порошка; поверхность насыпки сглажена. Материал из района: I—Океана Бурь с глубины 0,16 м; II — Океана Бурь с глубины 0,33 м; III—Моря Спокойствия с глубины 0,10—0,11 м; IV — Моря Изобилия с глубины доЪ,08 м; V—Моря Спокойствия с глубины 0,015 м. Погрешность измерений ±5%

мкы		II	III	IV	V
0,30	0,080	0,085	0,075	0,088	0,069
0,50	0,110	0,112	0,095	0,100	0,080
0,70	0,132	0,138	0,112	0,117	0,100
0,90	0,148	0,151	0,131	0,124	0,106
1,2	0,145	0,145	0,117	0,124	0,102
1,5	0,164	0,160	0,140	0,130	0,120
1,8				0,155	

Таблица 31.65. Показатель преломления некоторых жидкостей при температуре от 293 до 298 К

Жидкость	Х, нм	«	Литература
Альфамонобромнафталин	**589,3**	**1,6588**	**60**
Анилин	**589,3**	**1,586**	**62**
Ацетон	**546,1**	**1,3576**	**63**
	632,8	**1,3542**	**63**
Бензилбензоат	**589,3**	**1,568**	**62**
Бензол	**546,1**	**1,5030**	**63**
»	**589,3**	**1,5014**	**64**
»	**632,8**	**1,4950**	**63**
Бромоформ	**589,3**	**1,5980**	**64**
Вода дистиллированная + + глицерин (1:1)	**589,3**	**1,3981**	**65**
н-Гексан	**546,1**	**1,3742**	**63**
	632,8	**1,3711**	**63**
Глицерин	**589,3**	**1,4370**	**64**
Иодометилен	**589,3**	**1,7559**	**64**
Кислота:			
акриловая	**589,3**	**1,4224**	
валериановая		**1,4085**	**1 i**
винилуксусная	**589'з**	**1,4257**	**66**
изовалериановая	**589,3**	**1,4085**	**66**
метилуксусная	**589,3**	**1,4051**	**66**
серная	**589,3**	**1,4290**	**66**
соляная	**589,3**	**1,2540**	**66**
уксусная	**589,3**	**1,3720**	**66**
Масло:			
анисовое	**589,3**	**1,560**	
гвоздичное	**589,3**	**1,538**	**11?!**
касторовое	**589,3**	**1,480**	
кедровое	**589,3**	**1,515**	
коричное	**589,3**	**1,602**	
льняное	**589,3**	**1,485**	**29**
маковое	**589,3**	**1,463**	**29**
оливковое	**589,3**	**1,467**	**58**
парафиновое	**589,3**	**1,440**	**27**
подсолнечное	**589,3**	**1,470**	**56**
прованское	**589,3**	**1,460**	**62**
сандаловое	**589,3**	**1,508**	**58**
терпентиновое	**589,3**	**1,470**	
Метилацетат	**589,3**	**1,450**	**61**
Метилен иодистый	**589,3**	**1,737**	**61**
Метилсалицилат	**589,3**	**1,538**	**61**
Нитробензол	**546,1**	**1,5579**	**57**
»	**589,3**	**1,55257**	**51**
»	**632,8**	**1,5458**	**63**
Паральдегид	**589,3**	**1,405**	**62**
Парафин (жидкий)	**589,3**	**1,480**	**62**
Сероуглерод	**546,1**	**1,6347**	**63**
»	**589,3**	**1,620**	**58**
»	**632,8**	**1,6185**	**67**
Скипидар	**589,3**	**1,470**	**56**
Спирт:			
амиловый	**589,3**	**1,4053**	**66**
изопропиловый	**546,1**	**1,3757**	**63**
изопропиловый	**632,8**	**1,3726**	
метиловый	**546,1**	**1,3280**	**§**
	589 3	**1,3265**	**56**
»	**632^8**	**1,3253**	**63**
этиловый	**546,1**	**1,3612**	**63**
»	**589,3**	**1,3611**	**66**
»	**632,8**	**1,3583**	**63**
Толуол	**546,1**	**1,4986**	**63**
	589,3	**1,4980**	**56**
	632,8	**1,4901**	**63**

Продолжение табл. 31.65

Жидкость	л, нм		Литература
Углерод четыреххлористый	**546,1**	**1,4613**	**63**
То же	**589,3**	**1,4601**	**58**
»	**632,8**	**1,4547**	**63**
Хинолин	**589,3**	**1,627**	**62**
Хлорбензол	**589,3**	**1,525**	**62**
Хлороформ	**546,1**	**1,4477**	**63**
»	**589,3**	**1,4455**	**66**
»	**632,8**	**1,4435**	**63**
Циклогексан	**546,1**	**1,4260**	**63**
»	**632,8**	**1,4224**	**63**
Эйтенол	**589,3**	**1,540**	**58**
Этил коричный	**589,3**	**1,559**	**62**
Этилсалицилат	**589,3**	**1,523**	**62**
Эфир диэтиловый	**589,3**	**1,3526**	**66**

Таблица 31.66. Показатель преломления дистиллированной воды при 293 К [67]

Х, нм	«	Х, нм	«
250,0	**1,3773**	**3000**	**1,446**
308,0	**1,3569**	**3500**	**1,423**
359,0	**1,3480**	**3900**	**1,353**
400,0	**1,3433**	**4600**	**1,380**
434,0	**1,3403**	**5000**	**1,331**
486,0	**1,3371**	**6040**	**1,312**
546,1	**1,3341**	**7000**	**1,330**
589,3	**1,3330**	**8600**	**1,282**
632,8	**1,3314**	**10 000**	**1,212**
768,0	**1,3289**	**11000**	**1,140**
1000	**1,3247**	**12 600**	**1,165**
1250	**1,3210**	**12 600**	**1,280**
2000	**1,290**	**13 500**	**1,330**
2600	**1,252**	**14 000**	**1,309**

Таблица 31.67. Спектральный показатель поглощения чистых природных вод [67]

		Х, нм	
390	**0,038**	**530**	**0,062**
410	**0,037**	**550**	**0,074**
430	**0,036**	**570**	**0,094**
450	**0,037**	**590**	**0,16**
470	**0,039**	**610**	**0,26**
490	**0,042**	**650**	**0,38**
510	**0,054**	**690**	**0,54**

Таблица 31.68. Спектральный показатель поглощения а^ , м-i, морской воды различных акваторий [67]

Вода океанов взята из районов северных пассатных течений; вода Балтийского моря взята из района Рижского залива. Карибское море: а^ (X = 430 им) = 0,042 м-i. Саргассово море: а^ (X = 490 им) = 0,037 м-i. Средиземное море: а^ (X = 490 им) = 0,046 м-1. Черное море: а^ (X = 490 им) = 0,069 м-i

л, нм	Атлантический океан	Тихий	Балтийское море
390	0,032	0,12	2,7
410	0,034	0,15	1,9
430	0,021	0,15	1,2
450	0,018	0,13	0,90
470	0,014	0,087	0,83
490	0,012	0,064	0,62
510	0,018	0,060	0,44
530	0,030	0,060	0,39
550	0,034	0,067	0,30
570	0,055	0,085	0,25
590	0,14	0,17	0,28
610	0,24	0,26	0,37
650	0,33	0,36	0,41
690	0,52	0,56	0,62

Таблица 31.69. Показатель преломления оптических клеев и смол для X = 589,3 нм при температуре 293 К

Клей [68]:		УФ-235М жидкий	1,456
акриловый	1,4861	УФ-235М отвержденный	1,462
	1,530	Смола [54]: даммар	,515
	1,5191	казеин синтетический	,550
новый ОК-50П	1,5801	копал	,540
		шеллак оранжевый	,516
ОК-60	1,5151	янтарь	1,539-1,545
ОК-72Ф	1,586		
ОК-90ПЛ	1,5411		

31.14. ГАЗЫ И ПЛАЗМА

Таблица 31.70. Показатель преломления воздуха при давлении 10^ Па и температуре 288 К [62]

X, нм	«	л, нм	«
200	1,0003240	245	1,0003026
205	1,0003205	250	1,0003012
210	1,0003175	255	1,0002999
215	1,0003147	260	1,0002987
220	1,0003121	265	1,0002976
225	1,0003098	270	1,0002965
230	1,0003077	275	1,0002955
235	1,0003058	280	1,0002946
240	1,0003041	285	1,0002938

Продолжение табл. 31. 55

		X. нм	
290	1,0002930	600	1,0002769
295	1,0002922	650	1,0002763
300	1,0002915	700	1,0002757
310	1,0002901	750	1,0002753
320	1,0002889	800	1,0002750
330	1,0002878	850	1,0002747
340	1,0002868	900	1,0002745
350	1,0002860	950	1,0002743
360	1,0002852	1000	1,0002741
370	1,0002845	1200	1,0002737
380	1,0002839	1400	1,0002734
390	1,0002833	1600	1,0002732
400	1,0002827	1800	1,0002731
420	1,0002817	2000	1,0002730
440	1,0002809	2500	1,0002729
460	1,0002802	3000	1,0002728
480	1,0002795	5000	1,0002727
500	1,0002789	7000	1,0002726
520	1,0002784	10 000	1,0002726
540	1,0002780	20 000-	1,0002726
560	1,0002776	50 ООО	
580	1,0002772		

Таблица 31.71. Коэффициент теплового излучения воздуха при различных температуре и давлении [69]

Радиус полусферического слоя воздуха 0,1 м. Погрешность измерений ± 15%

Г. к	при давлении. Па			
	104		10"	5-10-
2000	2,89-10-5	2,91-10-^	2,88-10-8	1,41-10-2
3000	1,58-10-5	2,12-10-*	2,74-10-3	1,66-10-2
4000	9,42-10-''	2,73-10-^	4,30-10-3	2,61-10-2
5000	1,86-10-5	5,93-10-*	1,07-10-2	5,04-10-2
6000	3,02-10-5	1,02-10-8	2,38-10-2	1,33-10-1
7000	4,06-10-5	1,18-10-8	3,51-10-2	1,99-10-1
8000	1,10-10-^	1,46-10-8	4,00-10-2	2,88-10-1
9000	4,14-10-^	3,16-10-8	5,22-10-2	3,52-10-1
10 000	1,19-10-3	7,29-10-8	6,89-10-2	4,05-10-1
11000	2,64-10-3	1,39-10-2	9,53-10-2	4,68-10-1
12 000	4,39-10-8	2,63-10-2	1,40-10-1	5,09-10-1
13 000	5,51-10-3	4,02-10-2	1,63-10->	4,75-10-1
14 000	5,42-10-8	5,25-10-2	2,18.10-1	6,58-10-1
15 000	4,52-10-3	6,17-10-2	2,64-10-1	7,34-10-1
16000	3,58-10-8	6,82-10-2	3,14-10-1	8,54-10-1
17 000	2,76-10-8	7,04-10-2	3,49-10-1	8,23-10-1
18 000	2,24-10-8	6,85-10-2	3,62-10-1	8,56-10-1
19 000	1,79-10-3	6,27-10-2	3,65-10-1	8,27-10-1
20 000	1,53-10-3	5,37-10-2	3,65-10-1	8,63-10-1

Таблица 31.72. Коэффициент теплового излучения углекислого газа при различных температуре и давлении [69]

Радиус полусферического слоя газа 0,1 м

т, к	при давлении, Па		
			lO'»
2000	4.5-10-3	3,6-10-2	8,8-10-2
3000	1,2-10-^	3.0-10-3	3,2-10-2
4000	2,2-10-''	2.1-10-^	3.0-10-3
5000	2.6-10-5	2,2-10-^	1,4-10-3
6000	6,1-10-6	8,3-10-^	3.1-10-3

Таблица 31.73. Показатели преломления некоторых газов при нормальных условиях [62]

Погрешность измерений d= (5 — 7) • 10"\®

Азот 163]	**546,1**	**1,0002793**
	632,8	**1,0002781**
Аммиак	**589,3**	**1,000375**
Аргон [63]	**546,1**	**1,0002630**
	632,8	1,0002618
Ацетилен	**589,3**	1,000606
Бром	**589,3**	**1,001125**
Бромистый водород	**589,3**	**1,000570**
Водород	**589,3**	**1,000139**
	546,1	**1,0002354**
Водяной пар [63]	**632,8**	**1,0002337**
	447,3	**1,0002753**
Гелий [70]	**471,5**	**1,0002745**
	492,3	**1,0002738**
	501,7	**1,0002736**
	587.7	**1,0002719**
Дейтерий	**589.3**	**1,000137**
Закись азота		**1,000515**
Йодистый водород	**589^3**	**1,000906**
Кислород [63]	**546,1**	**1,0002531**
	632.8	**1,0002516**
Криптон (естественный) [70]	**450.4**	**1,0002752**
	556,4	**1,0002724**
	565,1	**1,0002722**
	587.3	**1,0002719**
	605,8	**1.0002716**
	645.8	**1,0002711**
Криптон (изотоп 56Кг) [71]	**556.4**	**1,0002724**
	587.3	**1.0002717**
	608.5	**1,0002716**
	760.4	**1,0002700**
	851,1	**1,0002695**
	877.9	**1,0002694**
	893,1	
	975,4	**1,0002690**
Ксенон	**589,3**	**1,000702**
Метан	**589.3**	**1,000441**
Неон [72]	**585.4**	**1,0002719**
	607.4	**1,0002716**
	614.5	**1,0002715**
	640,4	**1,0002711**
Озон [63]	**589,3**	**1,000511**
Оксид азота	**589,3**	**1,000297**
Оксид углерода [73]	**589,3**	**1,000334**

П родолжеъ

Газ	л, ии	п
Сернистый газ	**589,3**	**1 000660**
Серный ангидрид	**589,3**	**1 000737**
Сероводород	**589,3**	**1 000619**
Углекислый газ [63]	**546,1**	**1 0004197**
»	**632,8**	**1 0004174**
Фтор	**589,3**	**1 000195**
Фтористый метил	**589,3**	**1 000449**
Хлор	**589,3**	**1 000768**
Хлористый водород	**589,3**	**1 000444**
Хлористый метил	**589,3**	**1 000865**
Четыреххлористый теллур	**589,3**	**1 002600**
Шестифтористая сера	**589,3**	**1 000783**

1ица 31.74. Показатель преломления некоторых газов при температуре ожижения [74]

Вещество	*Т.* к	Х. мкк	
Азот	**78,0**	**0,589**	**1,205**
Водород	**20,4**	**0,589**	**1,0974**
Гелий:			
Не I	**4,2**	**0,546**	**1,0206**
Не II	**2,18**	**0,546**	**1,0269**
Кислород	**92.0**	**0,589**	**1,221**

Таблица 31.75. Спектральный коэффициент поглощения кислорода в ультрафиолетовой области спектра [69]

Температура 3000 К, толщина слоя 5 • 10-^ м

Х.м™	"л	Х, мкм	\
0,220	**0,35**	**0,250**	**0,14**
0,225	**0,29**	**0,255**	**0,10**
0,230	**0,26**	**0,260**	**0,09**
0,235	**0,22**	**0,265**	**0,07**
0,240	**0,19**	**0,270**	**0,04**
0,245	**0,15**	**0,275**	**0,02**

Таблица 31.76. Коэффициент теплового излучения водородной плазмы [69]

Радиус полусферического слоя плазмы 0,5 м. Погрешность измерений ± 20%

т, К	Г						
	20	15	10	7	4	2	
9000	**0,46**	**0,37**	**0,27**	**0,20**	**0,11**	**0,05**	**0,03**
10 000	**0,73**	**0,65**	**0,51**	**0,40**	**0,26**	**0,15**	**0,09**
11000	—	**0,85**	**0,75**	**0,66**	**0,50**	**0,31**	**0,20**
12 000			**0,92**	**0,85**	**0,70**	**0,51**	**0,38**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бришамбо Ш. П. Солнечное излучение и радиационный обмен в атмосфере. М.: Мир, 1969.

2. Новицкий Л. А.//Теплофизика высоких температур. 1967. Т. 5, № 5. С. 919-923

3. Новицкий Л. А.//Теплофизика высоких температур. 1968. Т. 6, № 3. С. 529—536.

4. Новицкий Л. А., Вдовин В. Г., Федотов Г. И.// Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1974. Вып. 6. С. 97—101.

5. Новицкий Л. А., Трушицына А. В.//Измерительная техника. 1970, № 7. С. 46—47.

6. Новицкий Л. А., Трушицына А. В., Варакина Л. П.//Приборы и системы управления. 1969, № 6. С 30-32.

7. Жевандров Н. Д. Поляризация света. М.: Наука, 1969.

8. Шерклифф У. Поляризованный свет. М Мир, 1965.

9. Оптико-электронные приборы для научных исследований/Под ред. Л. А. Новицкого. М.: Машиностроение, 1986.

10 Гуревич В. 3. Электрические инфракрасные излучатели. М.- Л.: Госэнергоиздат, 1963

11. Гуревич М. М. Введение в фотометрию. Л.: Энергия, 1968.

12. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Фотометрия быстропротекающих процессов: Справочник. М.: Машиностроение, 1983.

13. Лабораторные оптические приборы/Под ред. Л. А. Новицкого. М.: Машиностроение, 1979.

И. Измерение температур в объектах новой техники/Под ред. А. Н. Гордова. М.: Мир, 1965.

15. Кинджери В. А. Измерения при высоких температурах. М.: Металлургиздат, 1963.

16. Кизель В. А. Отражение света. М.: Наука, 1973.

17. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. М.: Физматгиз, 1961.

18. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник/Под ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974.

19. Криксунов Л. 3. Справочник по основам инфракрасной техники М.: Советское радио, 1978.

20. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1980.

21 Оптические материалы для инфракрасной техники/Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. М.: Наука, 1965.

22. Справочник по электротехническим материалам. Т. 11/Под ред. И. П. Богородицкого и В. В. Пасынкова. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960.

23. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат, 1968.

24. Goldsmith A., Watermann T. E., Hirschhorn H. I. Handbook of thermophysical properties of solid materials. Vol. I—IV. Oxford — London: Pergamon Press, 1963.

25. Оптическое стекло. Каталог СССР — ГДР. М.: Машприборинторг, 1979.

26. Лагутин В. И., Лиханов В. П., Никонова Е. И.// Оптико-механическая промышленность. 1984. № 5. С. 53—58.

27. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник/Под ред. Ю. М. Пятина. М.: Машиностроение, 1982.

28. Ландсберг Г. М. Оптика. М.: Наука. 1976.

29. Справочник конструктора оптико-механических приборов/Под ред. В. А Панова. Л.- Машиностроение,

ЙЮ Мальцев М. Д., Каракулина Г. А. Прикладная оптика и оптические изменения. M.z Машиностроение,

31. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.

32. Байбородин Ю. В., Гаража С. А. Электрооптический эффект в кристаллах и его применение в приборостроении. М.: Машиностроение, 1967.

33. Круз П., Макглоулин Л., Макквистан Р. Основы инфракрасной техники. М.: Воениздат, 1964.

34. Гарбуни М. Физика оптических явлений. М.: Энергия, 1967.

35. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972.

36. Хэкфорд Г. Л. Инфракрасное излучение. М.—Л.: Энергия, 1964.

37. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. М.: Машиностроение, 1970.

38. Климков Ю. М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами: М.: Советское радио, 1978.

39. Смоля А. В., Тюрина С. Л. Оптическая керамика на основе окиси иттрия//Оптико-физические измерения. М.: Издательство стандартов, 1977. С. 163—167.

40. Рабинович Г. Д., Слободкин Л. С. Терморадиационная и конвективная сушка лакокрасочных покрытий//Наука и техника, 1966.

41. Дракин И. И. Аэродинамический и лучистый нагрев в полете. М.: Оборонгиз, 1961.

42. Новицкий Л. А.//Теплофизика высоких температур. 1966. Т. 4, № 4. С. 621—631.

43. Новицкий Л. А.//Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7, № 5. С. 997—1007

44. Крошкин М. Г. Физико-технические основы космических исследований. М.: Машиностроение, 1969.

45. Леконт Ж- Инфракрасное излучение. М.: Физматгиз, 1958.

46. Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. М.: Наука, 1964.

47. Гуторов М. М. Основы светотехники и источники света. М.: Энергоатомиздат, 1983.

48. Philip R./J. phys. et radium. 1959. Vol. 20, № 5. P. 535-540.

49. Графит как высокотемпературный материал/Под ред. К. П. Власова. М.: Мир, 1964.

50. Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства веществ/Под ред. И. Т. Аладьева. М.: Наука, 1968

51. Петров В. А. Излучательная способность высокотемпературных материалов. М.: Наука, 1969.

52. Власов Л. В., Либерман А. А., Самойлов Л. Н. Измерение коэффициентов излучения высокотемпературных материалов//Проблемы энергетической фотометрии. М.: Атомиздат, 1979.

53. Мельников Ю. Ф. Светотехнические материалы. М.: Высшая школа, 1976.

54. Смит Г. Драгоценные камни. М.: Мир, 1980.

55. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1962.

^ 56.^Гаррисон Т. Р. Радиационная пирометрия М.:

57. Корнилов Н. И., Солодова Ю. П. Ювелирные камни. М.: Недра. 1983.

58. Биркбэк Р. К.//Тр. Американского о-ва инженеров-механиков. Сер. С. Теплопередача. 1972. Т. 94, № 3. С. 72—73./Пер. с англ. М.: Мир, 1973.

59. Биркбэк Р. К.//Приборы для научных исследований. 1972. № 7. с. 65—68.

60. Лунный грунт из Моря Изобилия/Под ред. А. П. Виноградова. М.: Наука, 1975.

61. Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1973.

62. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

63. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973.

64. Кривовяз Л. М., Пуряев Д, Т., Знаменская М. А.

Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974.
65. Воронков Г. Л. Ослабители оптического излучения. Л.: Машиностроение, 1980.
66. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. М.; Химия, 1977.
67. Иванов А. П. Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975.
68. Технология оптических деталей/Под ред. М. Н. Семибратова. М.: Машиностроение, 1978.
69. Радиационные свойства газов при высоких температурах/В. А. Каменщиков, Ю. А. Пластинин, В. М. Николаев. Л. А. Новицкий. М.: Машиностроение, 1971.
70. Martin W. C.//JOSA. 1960. Vol. 50, № 2. P. 174—177.
71. Littlefield T. A.//Nature. 1950. Vol. 165. P. 187-189.
72. Bums J., Adams G., Longwell F.//JOSA 1950. Vol. 40, № 5. P. 340—346,
73. Енохович А. С. Краткий справочник по физике. М.: Высшая школа, 1968.
74. Справочник по физико-техническим основам криогеники. — 3-е изд./Под ред. М. П. Малкова. М.—Л.: Энергоатомиздат, 1985.

Глава 32

СПЕКТРЫ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Л. л. *Радциг*

2.1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенные процессы излучения и поглощения света в среде атомных и молекулярных частиц обусловлены переходами между их электронными состояниями и могут быть подразделены на три типа: 1) свободно-свободные переходы (тормозное излучение и поглощение света при рассеянии электронов на атомах и ионах, сплошной спектр); 2) связанно-свободные переходы (фотононизация атомов и молекул и фоторекомбинация электронов на ионах и нейтральных частицах, сплошной спектр) и 3) связанно-связанные (дискретные) переходы (линейчатый спектр атомов и полосатый спектр молекул).

Мы подробно остановимся только на дискретных спектрах атомов и молекул в оптическом диапазоне длин волн, которые возникают при переходах электронов в пределах внешней (валентной) оболочки, а также связаны с изменениями колебательно-вращательных состояний молекулярных частиц. Соответственно будет представлена информация о возбужденных состояниях атомных частиц и параметрах тонкой, сверхтонкой и изотопической структуры в их спектрах. В случае молекулярных частиц будут рассмотрены спектроскопические постоянные и электронные термы наиболее распространенных двухатомных молекул.

32.2. ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ АТОМОВ

Линейчатый спектр нейтральных атомов в оптическом диапазоне (инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом, см. табл. 32.1) обусловлен, как правило, переходами внешнего валентного электрона На рис. 32.1—32.43 представлены комбинированные диаграммы уровней энергии и спектров (называемые так-

Таблица 32.1. Сложившиеся «именные» диагазоны длин волн электромагнитного излучения

Тип волны	Диапазон длин волн. 10^{-6} м	Диапазон энергий квантов излучения, эВ	Диапазон характерных температур T. К источника теплового излучения: $ftv = 2{,}82\ kT$
Радиоволны:			
сверхдлинные	1014-10"	1,2-10-1»-1,2-10-14	5,1-10-'—5,1-10-"
длинные	1013-1014	1,2-10-S—1,2-10-10	5,1.10-6-5,1.10-'
средние	1012_1013	1,2-10-8—1,2-10-9	5,1-10-5-5,1-10-6
короткие	10"-1012	1,2-10-'-1,2-10-8	5,1-10-^-5,1-10-5
ультракороткие (УКВ)	10«-10»	0,0124-1,2-10-'	51-5,1-10-^
Инфракрасное излучение:			
далекое		**0,124—1,24-10-8**	**510-5**
близкое	7500-105	1,65-0,124	6803—510
Видимый свет:			
красный	6500-7500	1,91-1,65	7Й49-6803
оранжевый	5900-6500	2,10-1,91	8647-7849
желтый	5300-5900	2,34-2,10	9626—8647
зеленый	4900-5300	2,53-2,34	10 412-9626
синий	4200-4900	2,95-2,53	12 148-10412
фиолетовый	4000—4200	3,10-2,95	12 755—12 148
Ультрафиолетовое излучение:			
ближнее	2000-4000	6,20-3,10	25510-12 755
дальнее (вакуумное)	100-2000	124—6,20	5,1-105—25 510
Рентгеновское излучение:			
мягкое	1-20	1,24-104-620	**5,1-10'-2,6-10''**
жесткое	0,06-1	2,07-10^—1,24-10«	8,5-108-5,1-10'
Гамма-излучение	5-10-4-2	2,48-10'—6,2-108	1,0-10"-2,5-10'

Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974.
65. Воронков Г. Л. Ослабители оптического излучения. Л.: Машиностроение, 1980.
66. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. М.; Химия, 1977.
67. Иванов А. П. Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975.
68. Технология оптических деталей/Под ред. М. Н. Семибратова. М.: Машиностроение, 1978.
69. Радиационные свойства газов при высоких температурах/В. А. Каменщиков, Ю. А. Пластинин, В. М. Николаев. Л. А. Новицкий. М.: Машиностроение, 1971.
70. Martin W. C.//JOSA. 1960. Vol. 50, № 2. P. 174—177.
71. Littlefield T. A.//Nature. 1950. Vol. 165. P. 187-189.
72. Bums J., Adams G., Longwell F.//JOSA 1950. Vol. 40, № 5. P. 340—346,
73. Енохович А. С. Краткий справочник по физике. М.: Высшая школа, 1968.
74. Справочник по физико-техническим основам криогеники. — 3-е изд./Под ред. М. П. Малкова. М.—Л.: Энергоатомиздат, 1985.

Глава 32

СПЕКТРЫ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Л. л. *Радциг*

2.1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенные процессы излучения и поглощения света в среде атомных и молекулярных частиц обусловлены переходами между их электронными состояниями и могут быть подразделены на три типа: 1) свободно-свободные переходы (тормозное излучение и поглощение света при рассеянии электронов на атомах и ионах, сплошной спектр); 2) связанно-свободные переходы (фотононизация атомов и молекул и фоторекомбинация электронов на ионах и нейтральных частицах, сплошной спектр) и 3) связанно-связанные (дискретные) переходы (линейчатый спектр атомов и полосатый спектр молекул).

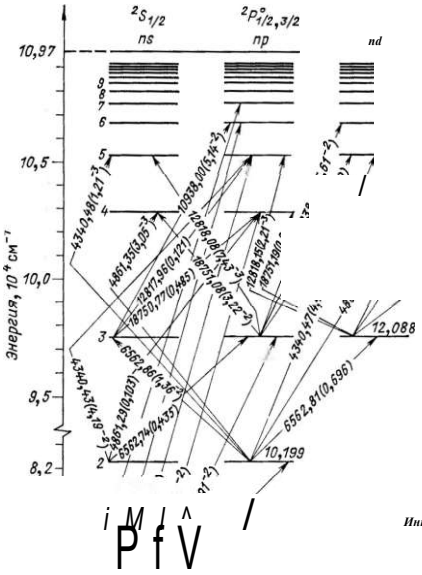
Мы подробно остановимся только на дискретных спектрах атомов и молекул в оптическом диапазоне длин волн, которые возникают при переходах электронов в пределах внешней (валентной) оболочки, а также связаны с изменениями колебательно-вращательных состояний молекулярных частиц. Соответственно будет представлена информация о возбужденных состояниях атомных частиц и параметрах тонкой, сверхтонкой и изотопической структуры в их спектрах. В случае молекулярных частиц будут рассмотрены спектроскопические постоянные и электронные термы наиболее распространенных двухатомных молекул.

32.2. ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ АТОМОВ

Линейчатый спектр нейтральных атомов в оптическом диапазоне (инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом, см. табл. 32.1) обусловлен, как правило, переходами внешнего валентного электрона На рис. 32.1—32.43 представлены комбинированные диаграммы уровней энергии и спектров (называемые так-

Таблица 32.1. Сложившиеся «именные» диагазоны длин волн электромагнитного излучения

Тип волны	Диапазон длин волн. 10^{-6} м	Диапазон энергий квантов излучения, эВ	Диапазон характерных температур T. К источника теплового излучения: $ftv = 2{,}82\ kT$
Радиоволны:			
сверхдлинные	1014-10"	1,2-10-1»-1,2-10-14	5,1-10-'—5,1-10-"
длинные	1013-1014	1,2-10-S—1,2-10-10	5,1.10-6-5,1.10-'
средние	1012_1013	1,2-10-8—1,2-10-9	5,1-10-5-5,1-10-6
короткие	10"-1012	1,2-10-'-1,2-10-8	5,1-10-^-5,1-10-5
ультракороткие (УКВ)	10«-10»	0,0124-1,2-10-'	51-5,1-10-^
Инфракрасное излучение:			
далекое		**0,124—1,24-10-8**	**510-5**
близкое	7500-105	1,65-0,124	6803—510
Видимый свет:			
красный	6500-7500	1,91-1,65	7Й49-6803
оранжевый	5900-6500	2,10-1,91	8647-7849
желтый	5300-5900	2,34-2,10	9626—8647
зеленый	4900-5300	2,53-2,34	10 412-9626
синий	4200-4900	2,95-2,53	12 148-10412
фиолетовый	4000—4200	3,10-2,95	12 755—12 148
Ультрафиолетовое излучение:			
ближнее	2000-4000	6,20-3,10	25510-12 755
дальнее (вакуумное)	100-2000	124—6,20	5,1-105—25 510
Рентгеновское излучение:			
мягкое	1-20	1,24-104-620	**5,1-10'-2,6-10''**
жесткое	0,06-1	2,07-10^—1,24-10«	8,5-108-5,1-10'
Гамма-излучение	5-10-4-2	2,48-10'—6,2-108	1,0-10"-2,5-10'



Щ595ЭВ

Z

13,055

k /

0,0'^57'^• 0,01525 0,00762 0,00Ш 0,00008 0,00780

$^2P^o_{3/2}$ $^2D_{5/2}$ $^2P^o_{1/2}$ $^2D_{3/2}$

0,10841 0,03614

$^2S_{1/2}$ $^2P^o_{3/2}$ $^2P^o_{1/2}$ $^2D_{3/2}$

0,01050 0,00018

$^2P^o_{3/2}$ $^2P^o_{1/2}$ $\Delta E_{fs}=0,36589$

$^2S_{1/2}$ *0,03529*

*Интерда/гы тонкой шруктуры,м'^ Пэмбобскай сдвиг дробней, см'^*

i M I ^ /

P f V

O-i- 1 •

Рис. 32.1 Диаграмма Гротриана для атома водорода

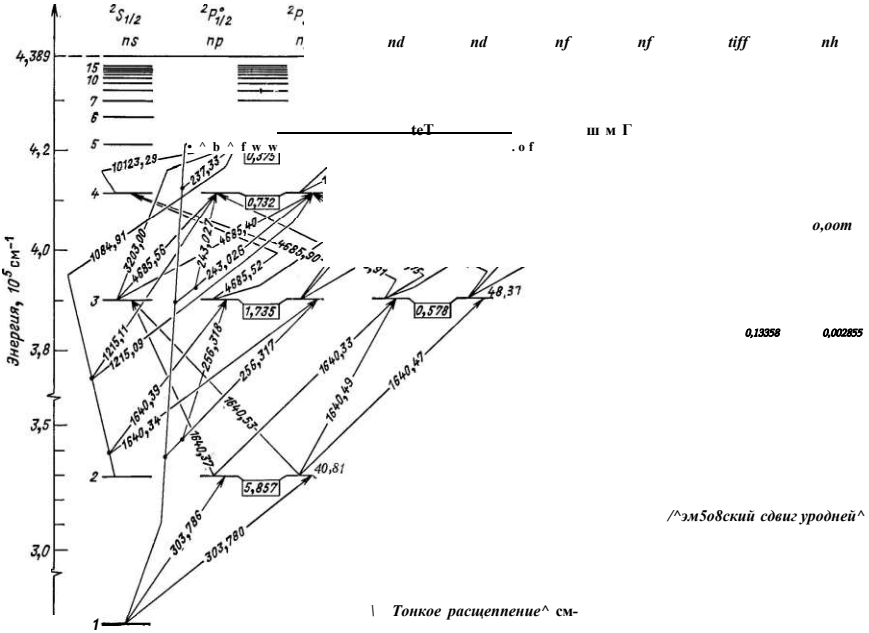


Рис. 32.2. Диаграмма Гротриана для иона гелия

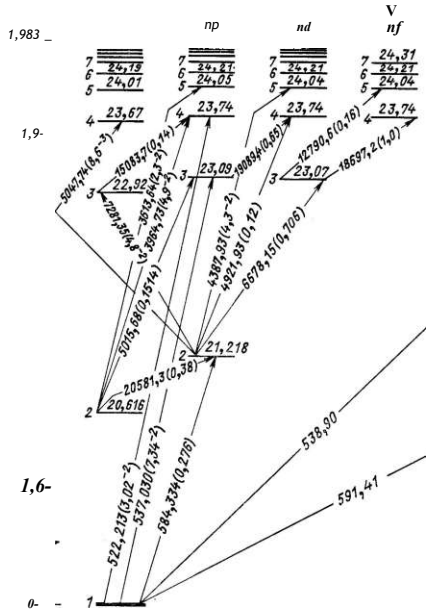
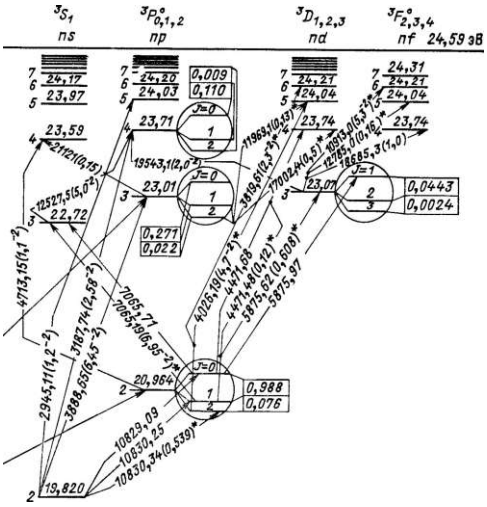


Рис. 32.3. Диаграмма Гротриаиа для атома гелия



*Тонкое расш,еппение, см"^*

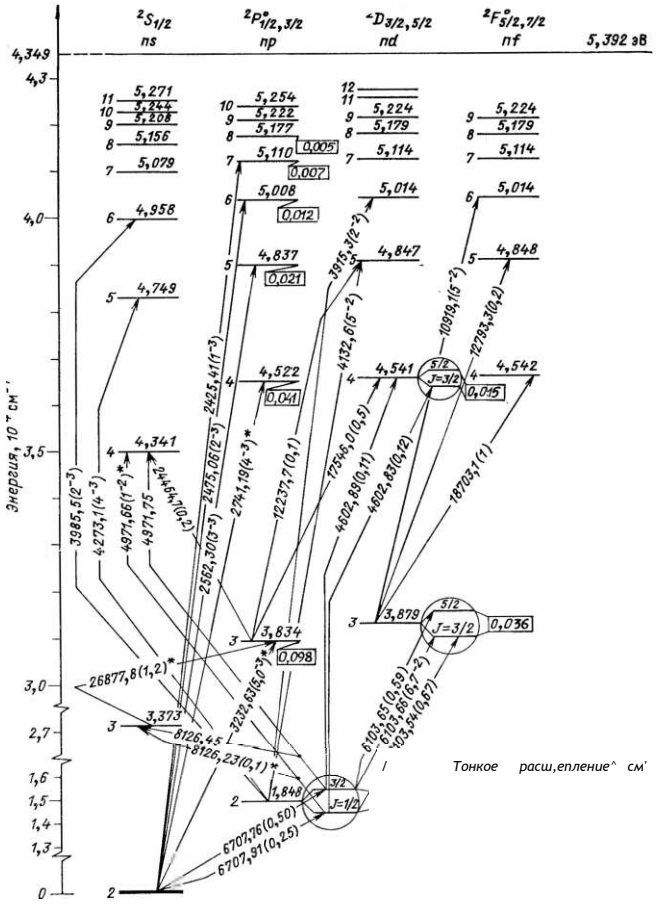


Рис. 32.4. Диаграмма Гротриана для атома лития

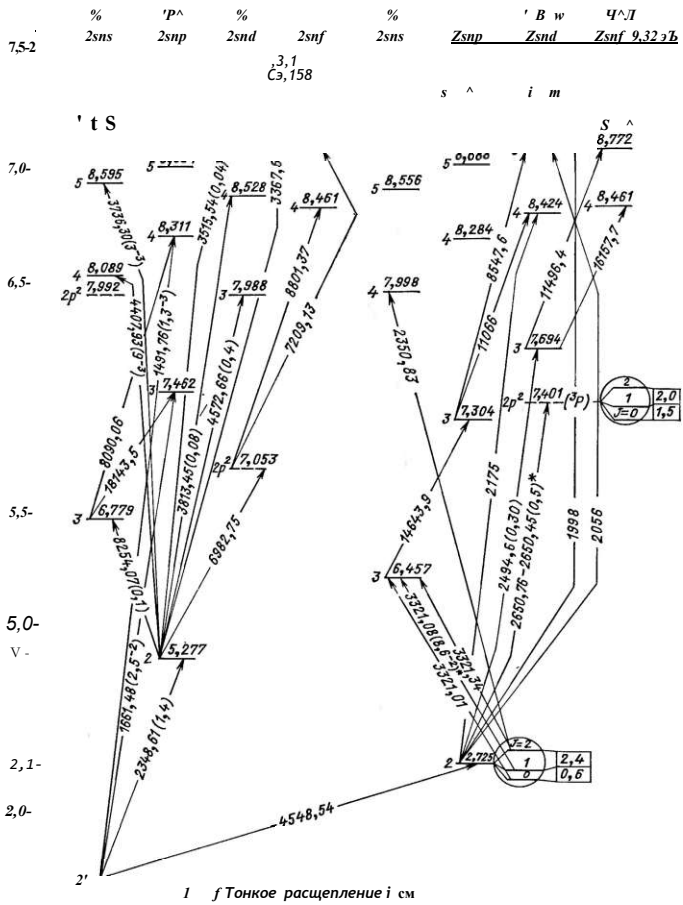


Рис. 32.5. Диаграмма Гротриана для атома бериллия

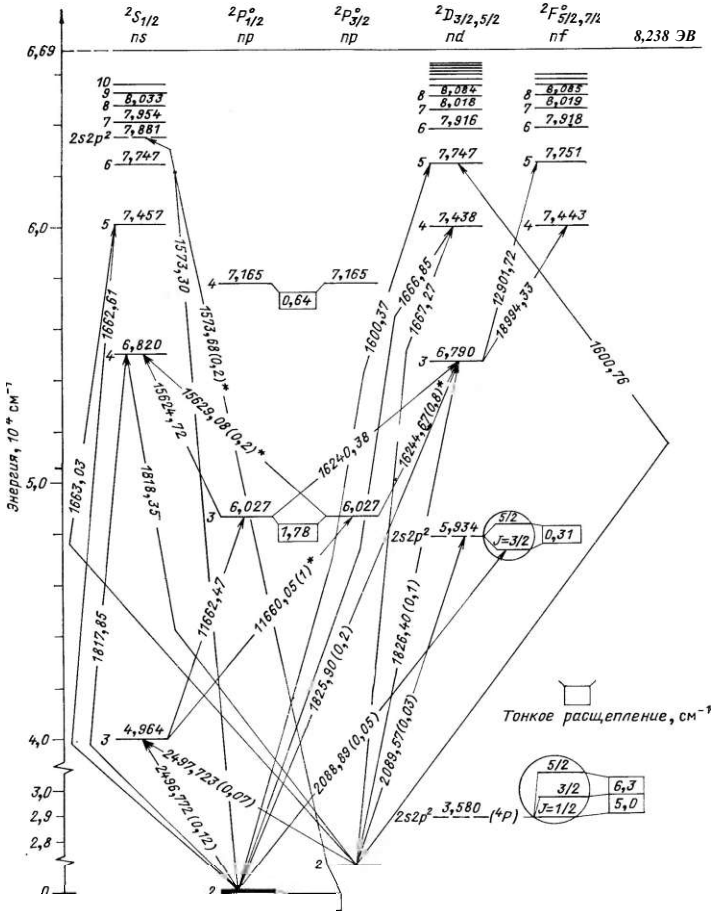
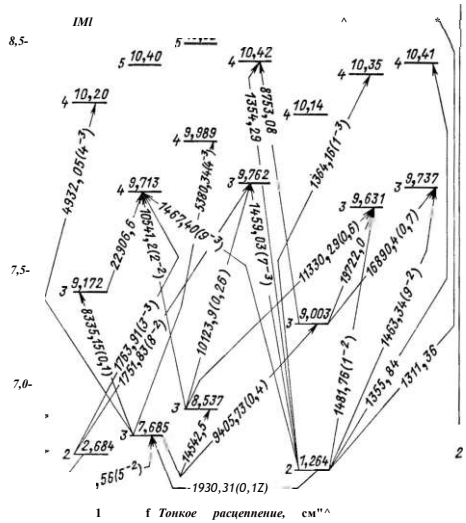


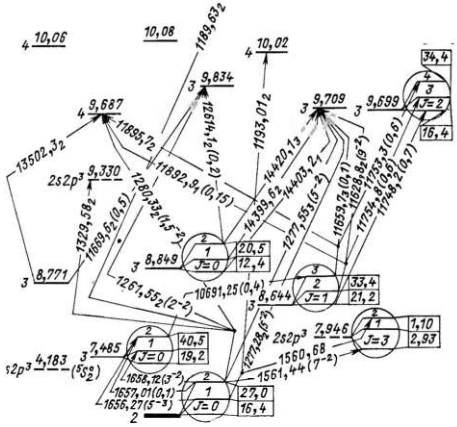
Рис. 32.6. Диаграмма Гротриана для атома лития



Рие. 32.7. Диаграмма Гротриана для атома углерода

^ ^ ^ ^

^ ^ s m i l s m . s i M i


4 10,06
10,08
1189,63₂
4 10,02
34,4
3 9,834
4 9,687
3 9,709
3 9,699
4,3=2
16,4
1193,01₂
1189,57₂
13502,3₂
1261,41₂(1)
1442,01₃
2s2p³ 9,330
1329,58₂
1669,52₂(0,5)
1277,55₂(2-2)
1277,55₃(5-2)
1165,13(0,1)
1175,80₂(0,7)
3 8,771
3 8,848
20,5
12,4
J=0
3 8,644
33,4
21,2
J=1
10691,25(0,4)
1261,55₂(2-2)
7,946
1,10
2,93
J=3
7,485
40,5
19,2
4,183
1560,68(7-2)
1658,12(3-2)
1657,01(0,1)
1656,27(5-3)
27,0
16,4
2

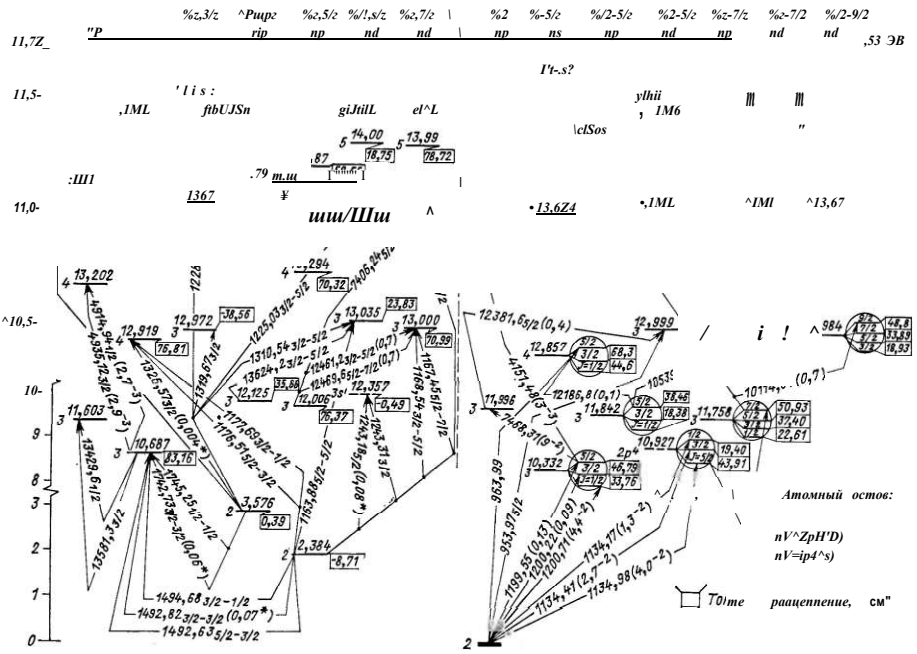


Рис. 32.8. Диаграмма Гротриана для атома стронция

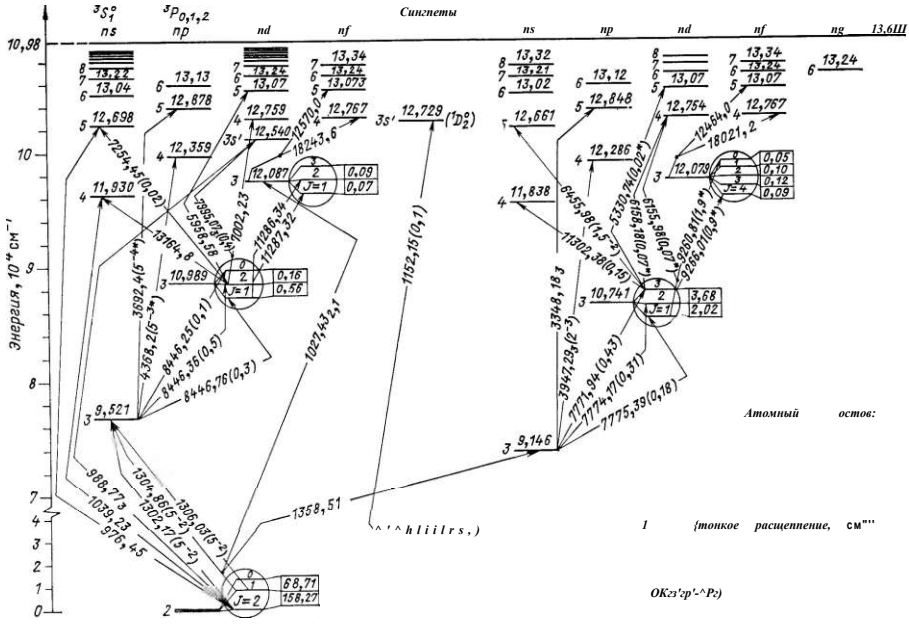


Рис. 32.9 Диаграмма Гротриана для атома кислорода

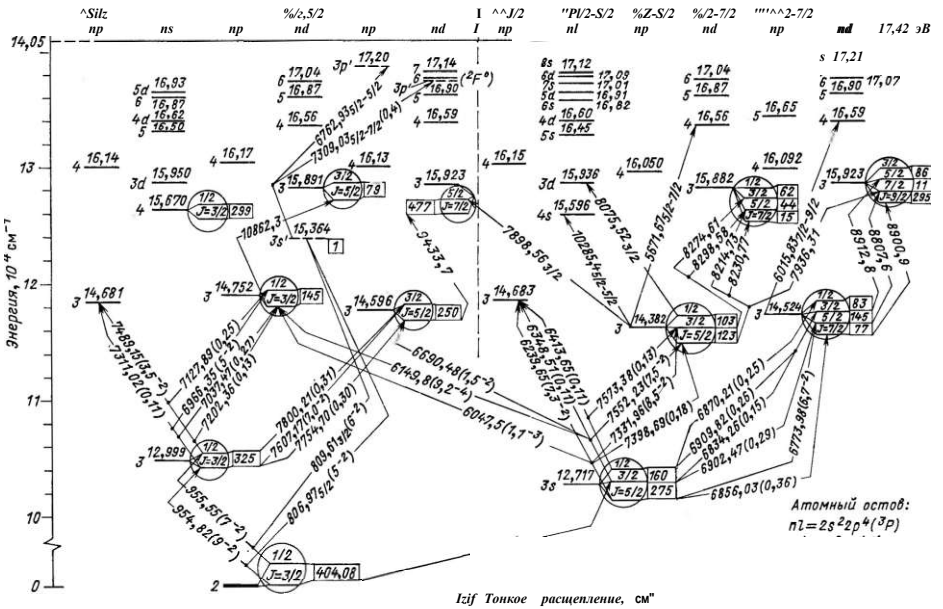


Рис. 32,10. Диаграмма Гротриана для атома фтора

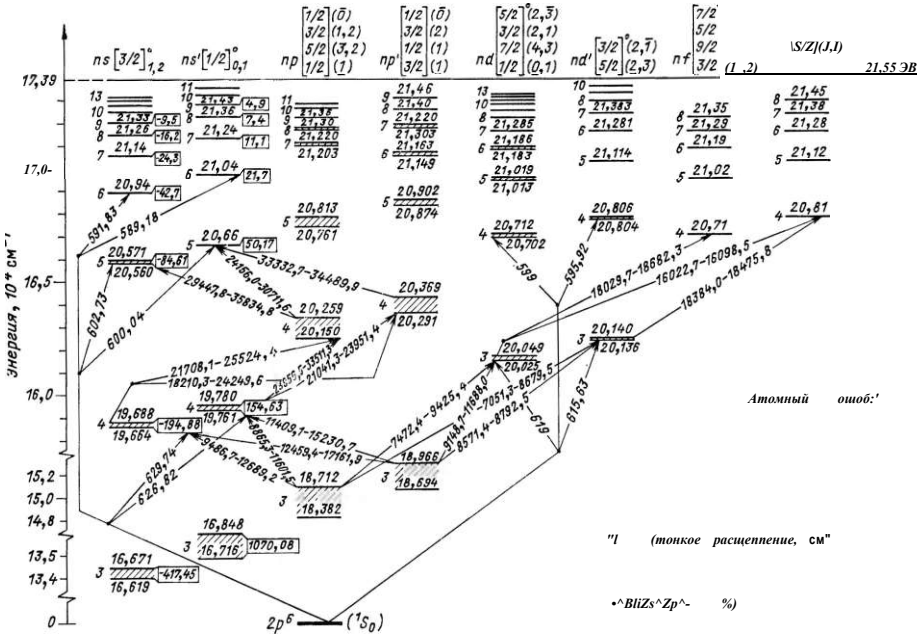


Рис. 32.11. Диаграмма Гротриана для атома неона

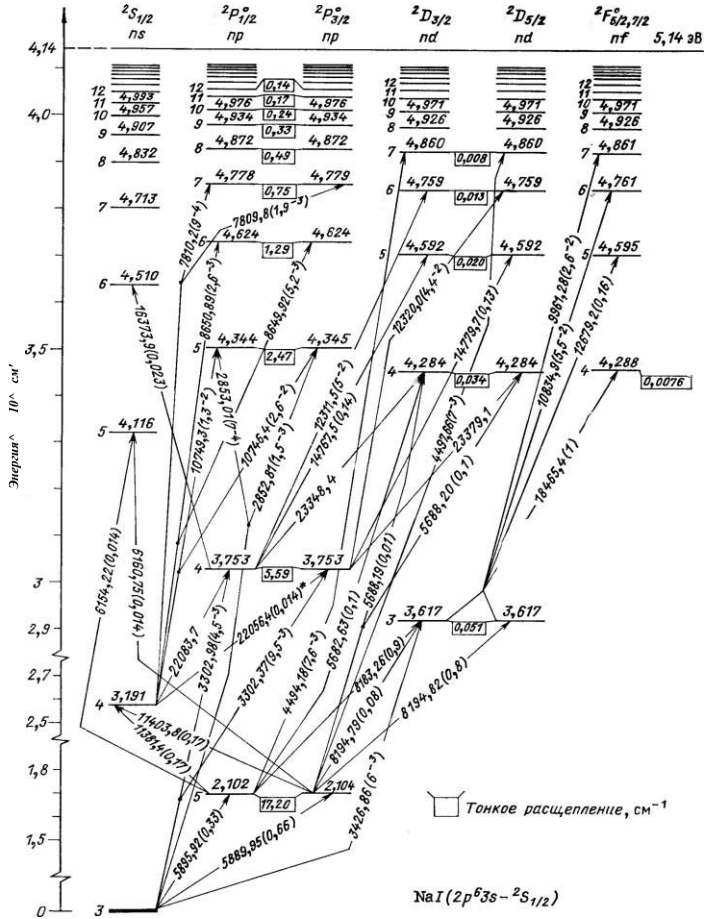


Рис. 32.12. Диаграмма Гротриана для атома кобальта

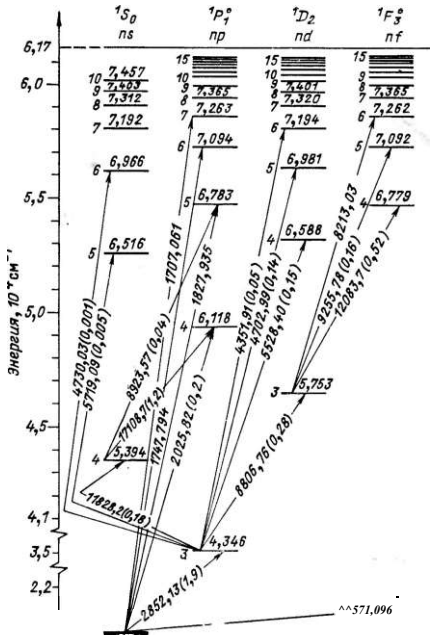
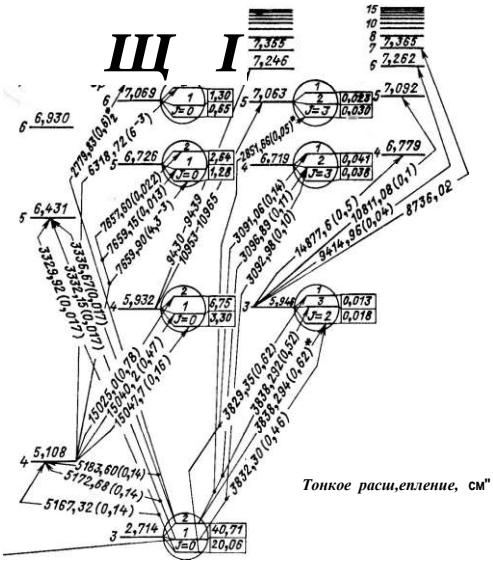


Рис. 32.13. Диаграмма Гротриана для атома стронция


Щ I
7,365
7,246
7,262
6,930
6,431
5,108
2,714
Тонкое расш,епление, см"

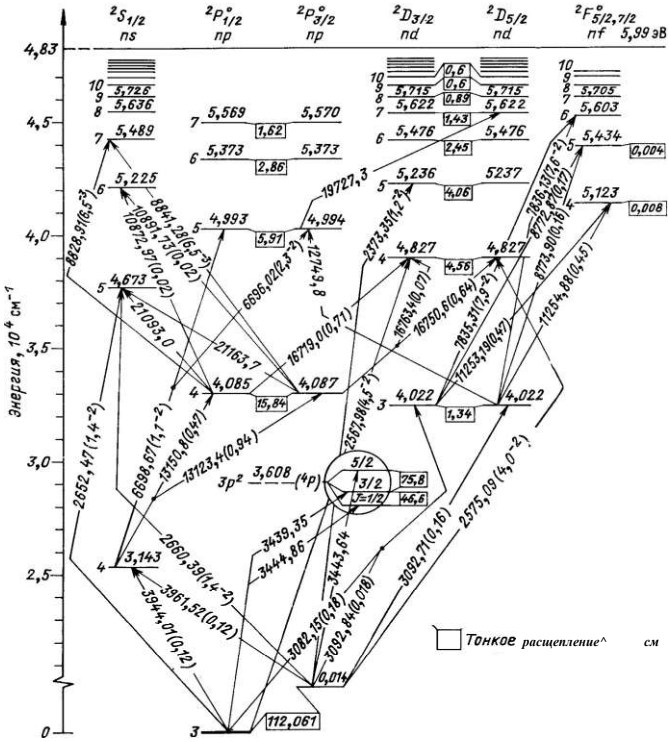


Рис. 32.14. Диаграмма Гротриана для атома алюминия

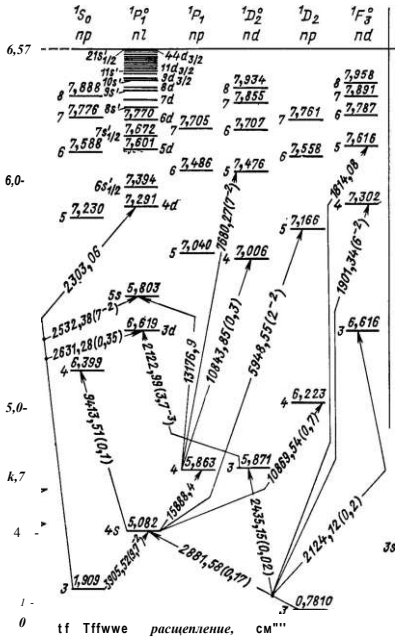
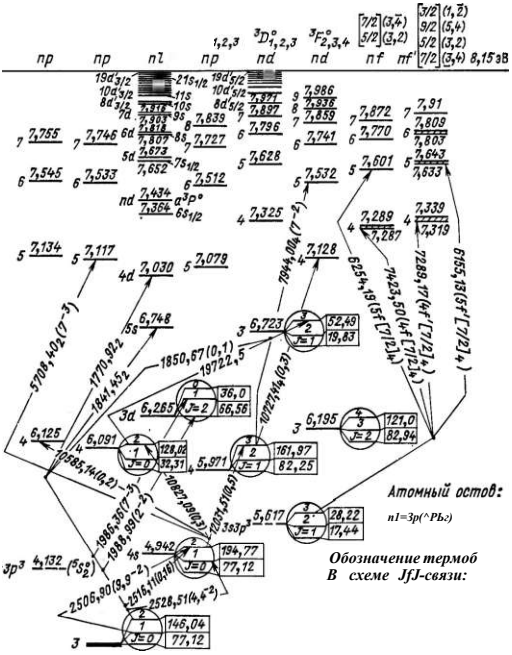


Рис. 32.15. Диаграмма Гротриана для атома кремния


Атомный остов:
n1=3p(^Pb₂)
Обозначение термов
В схеме JfJ-связи:

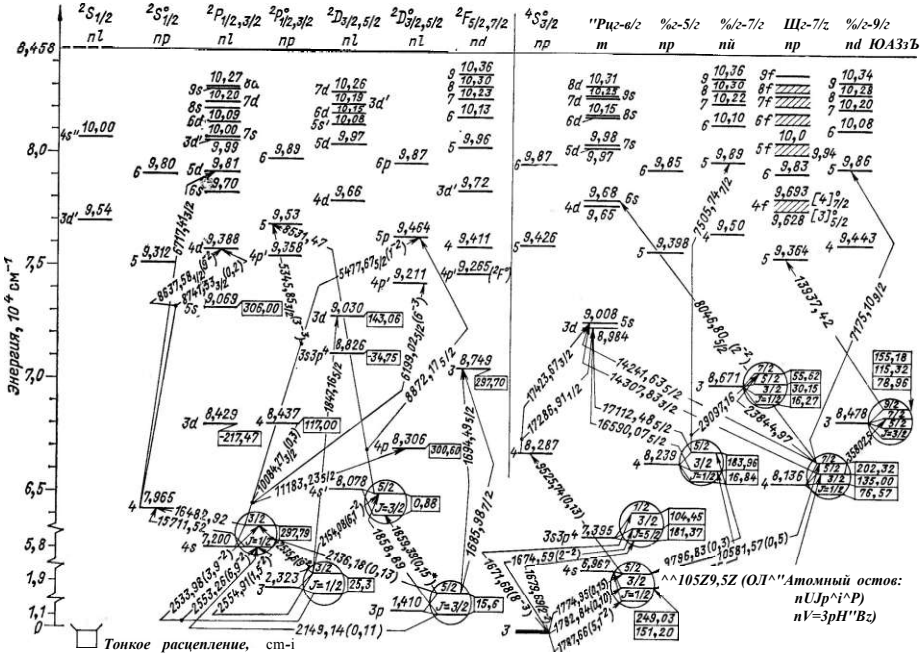


Рис. 32.16. Диаграмма Гротриана для атома фосфора

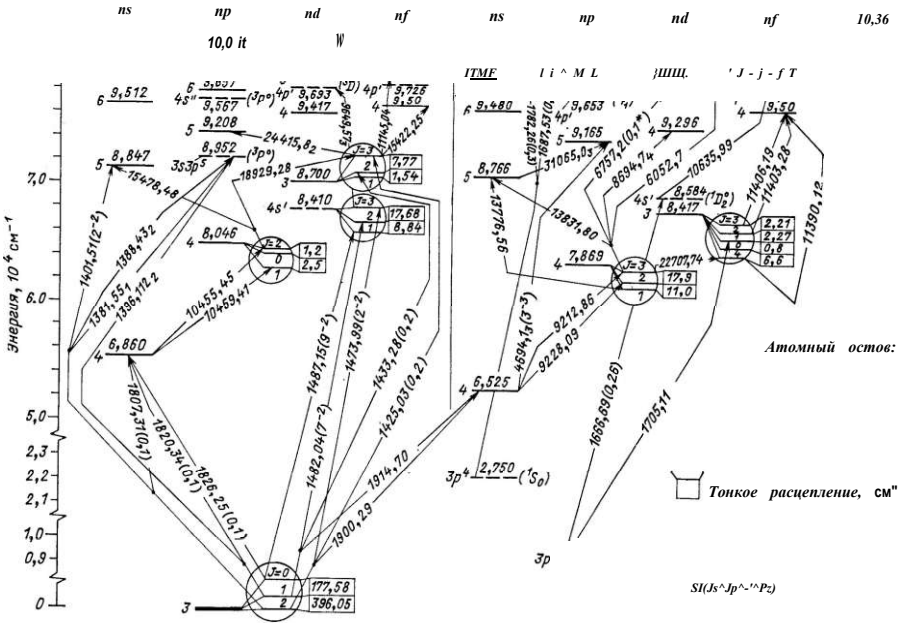


Рис. 32.17. Диаграмма Гротриана для атома стронция

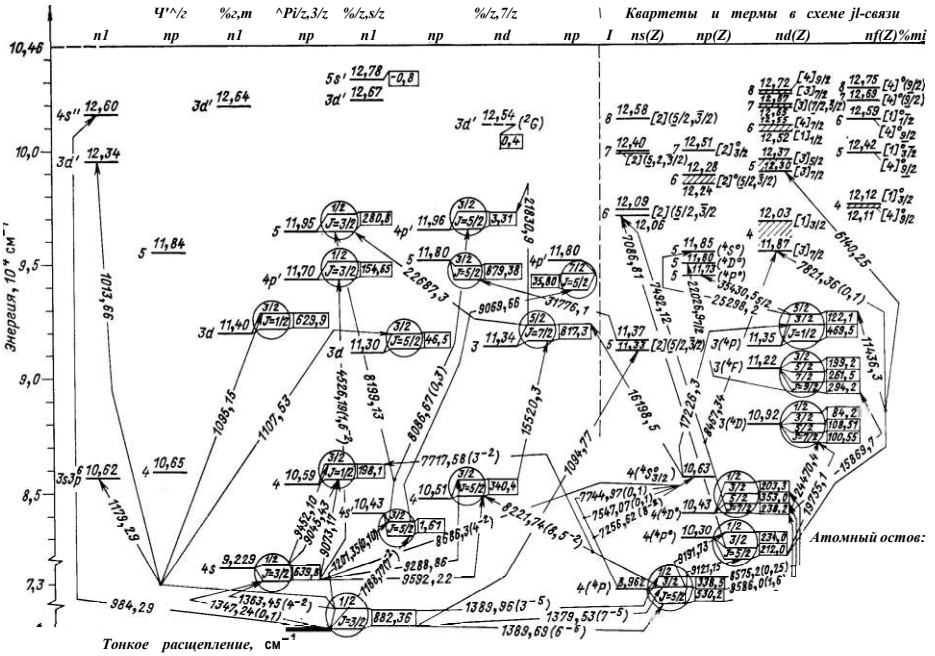


Рис. 32.18. Диаграмма Гротриана для атома хлора

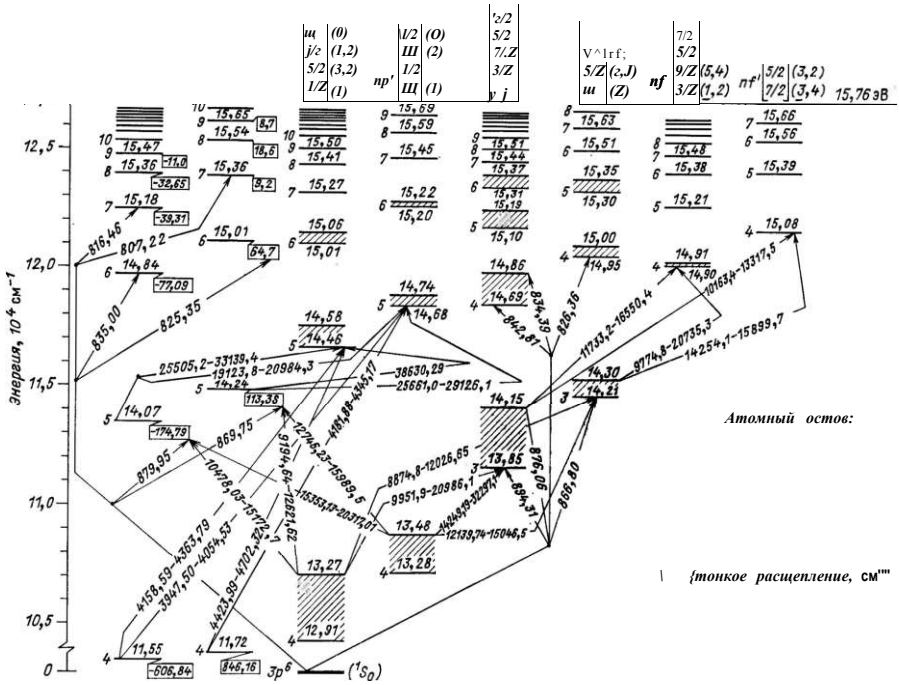


Рис. 32.19. Диаграмма Гротриана для атома кобальта

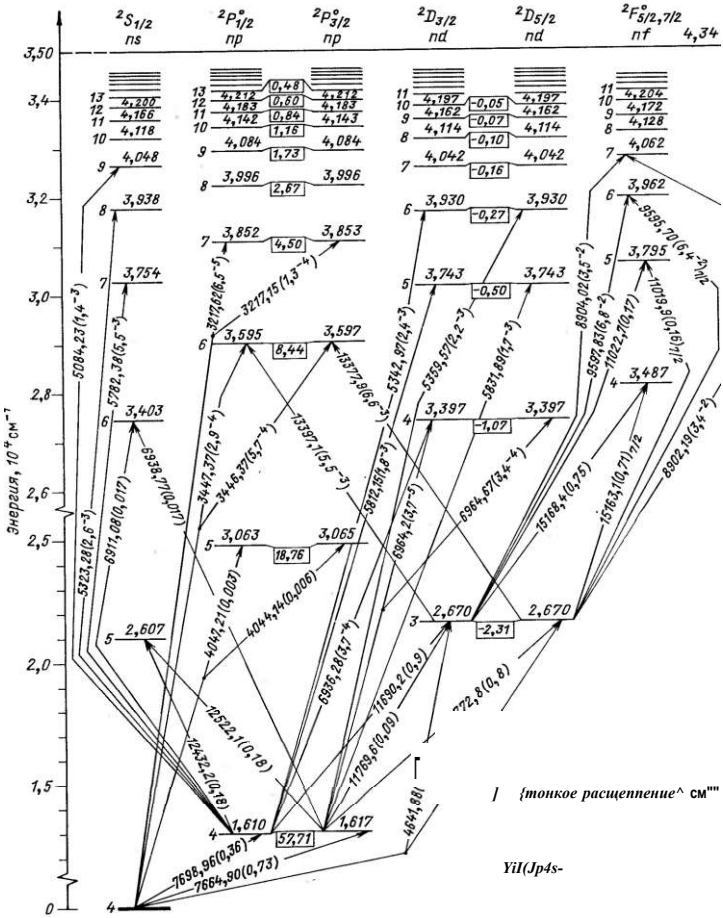


Рис. 32.20. Диаграмма Гротриаиа для атома калия

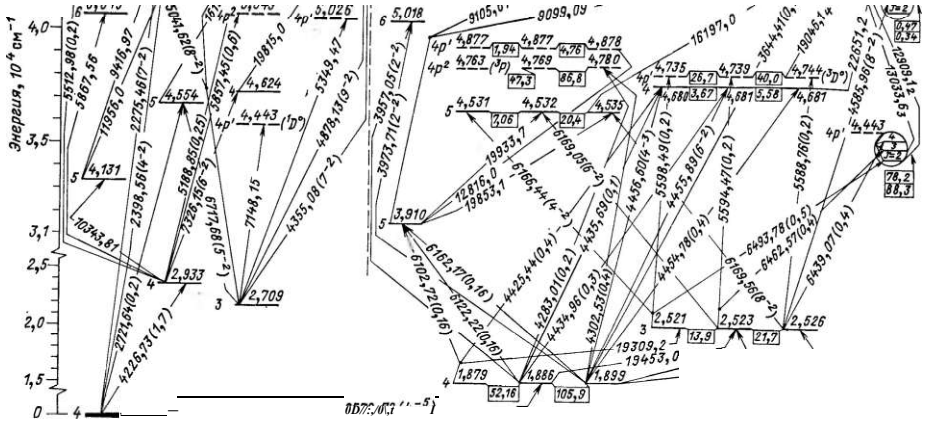
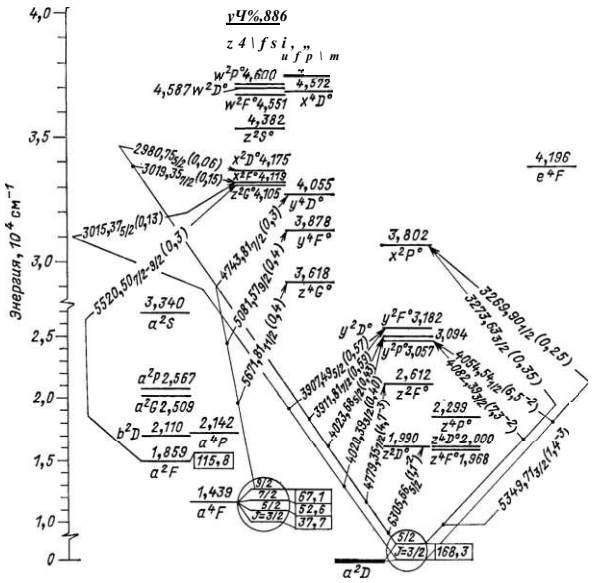


Рис. 32.21. Диаграмма Гротриана для атома стронция

Четность (Р)	*+ 1*	*-1*	*+1*	*-1*	*+ 1*	*-1*	*+ 1*		*+ 1*	
Эл. конд}игураци,ия	*Jd^if-s*	*за^^р*	*ddks^*	*Sd^s^p*			*Jd^sSs*		*3d4s^d*	
*Нуль типпетность (ZS*1)*		*Z ^*	*Z*		. I I .	*1*	*Z*	*Ч*	*Z*	4



'I (тонкое раацеппение, см"

Четность (Р)	*+1*	*-1*	*•и*	*-1*	*+1*
Эл.консригураи,ия	*3d4s*	*3d4p*	*3d4s^*	*3d4s4p*	*3d''*
Нупьтиппетиость(г8+1)	U				Ч

B,82эЪ

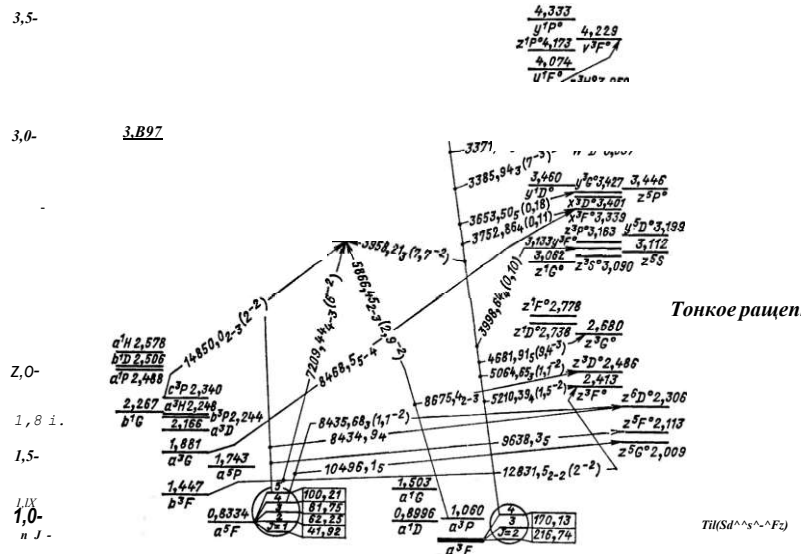


Рис. 32.23. Диаграмма Гротриана для атома кобальта

Четность (P)	+7	*-1*	*+1*	*-1*	+7
Эл.кон1ригураци,ия	*3 d 4 s*	*3 d 4 p*			
HynbmunnemHocmbiZS+i)				*z* 1 *1 s*	Ч 11 ^

3,5-

JbOZL

C^p

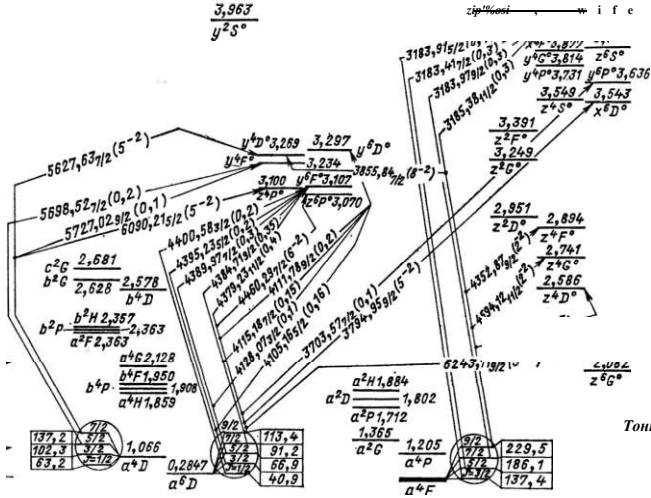
3,0

2,0

1,1

1,0-

Тонкое расцепление, см""



Четность (Р)

Э/1.консригураи,ия *за^^р*

*Мультиплетность(15*1)* 7 || 5 [J][7 ~ 7 || 5 || J ЦУ 7 | 5 || J [[Т ~ 7 [5 || J [У 7 | 5 [J [

S.'tB *6,7Б6* эВ

3,0

Ъ

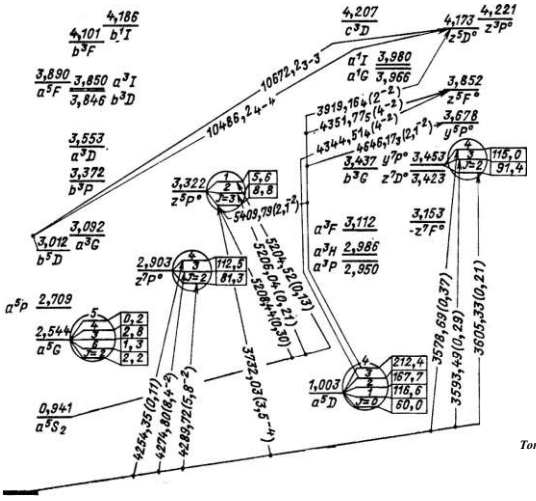


Рис. 32.25. Диаграмма Гротриана для атома стронция

Четность (Р)	*+ 1*	*-1*	*+1*	*-1*	*+ 1*	*+.1*
Э/1. нонцгурация	*за 4 s*			*3d4s^p(5p)*	*3CI%S5S*	
*Мупьтиппетноть(гЗ*1)*			2 1 4 *В*		^ ^ 1 5	4 1 *ff 8*

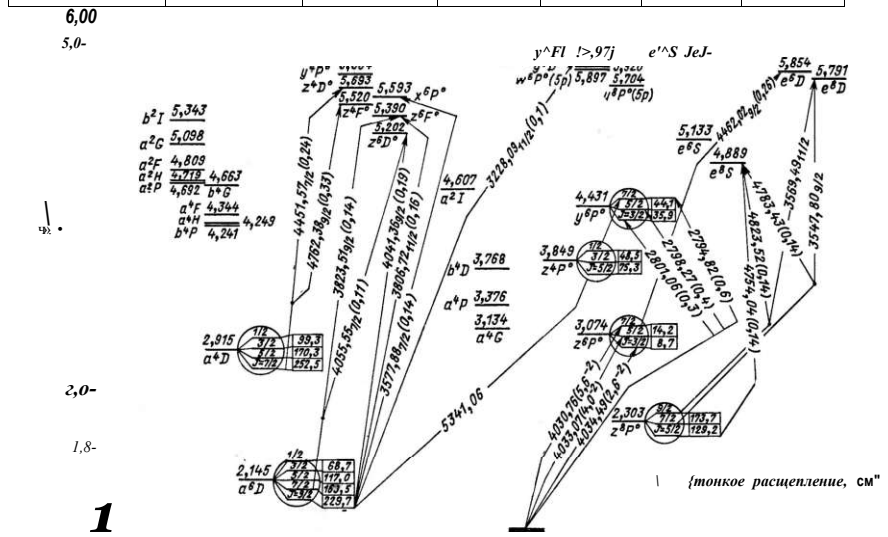


Рис. 32.26. Диаграмма Гротриана для аюма марганца

Четность (Р)	*+1*	*-1*	*•hi*	*-1*	*+1*	*+1*	*-1*
Эл. конфигурация	*3ct4s*	*заЧр*			*3d4s5s*	*за'*	
Муяьтип/!етность(2s+1) 1 7 1 5-						*3*	

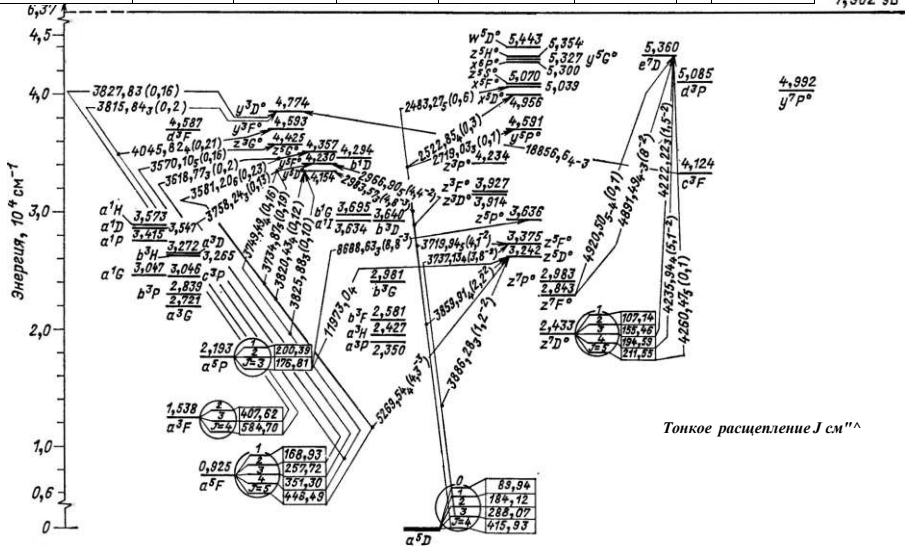


Рис. 32.27. Диаграмма Гротриана для атома стронция

Четность (Р)	*+1*	*-1*	*+1*	*-1*	*+ 1*
Эп. консригурация	*3d4s*	*3йЧр*			*за'*
*Мультипе1етность(2S*1)*			Ч 11 ^	. 1. h	

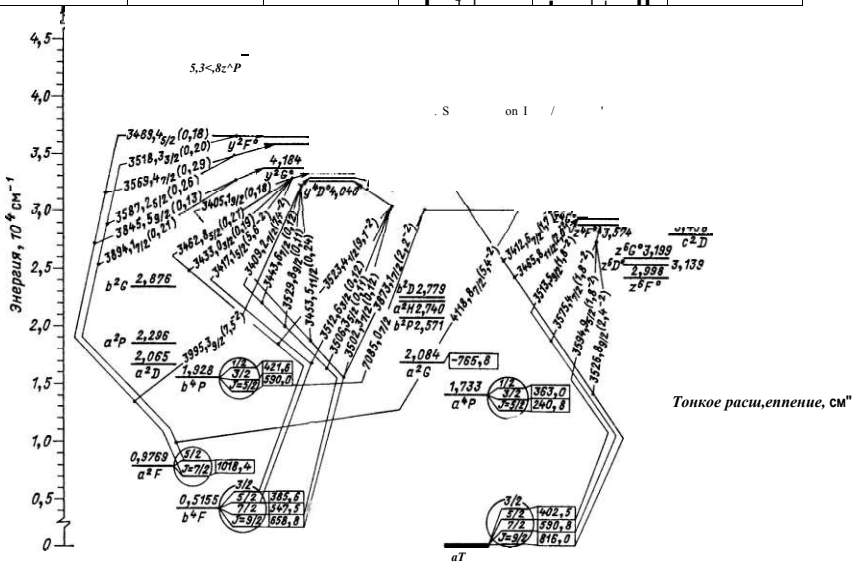


Рис. 32.28. Диаграмма Гротриана для атома кобальта

Четность (Р)	*+1*	*-1*	*+1*	*-1*	*+1*	*-1*	*+ 1*	*+1*	*+ 1*
Э/т. консригурация		*3йЧр*			*3dhs5s*	*3d^5p*	*3d4s*	*3d''>*	*3d4d*
*Мультиппетность (2S*1)*			*1* ‖ ^ ‖ **5**		*1* **J 1 5**			*1*	

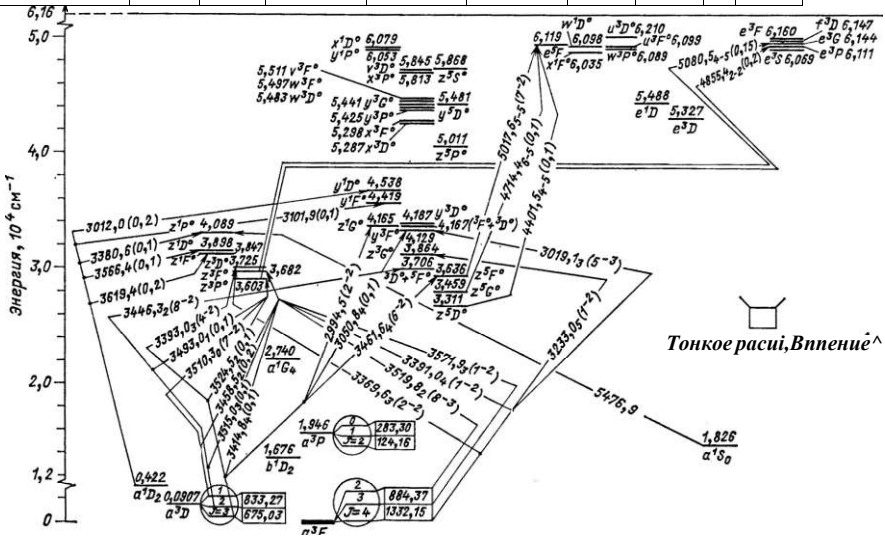


Рис. 32.29. Диаграмма Гротриаиа для атома никеля

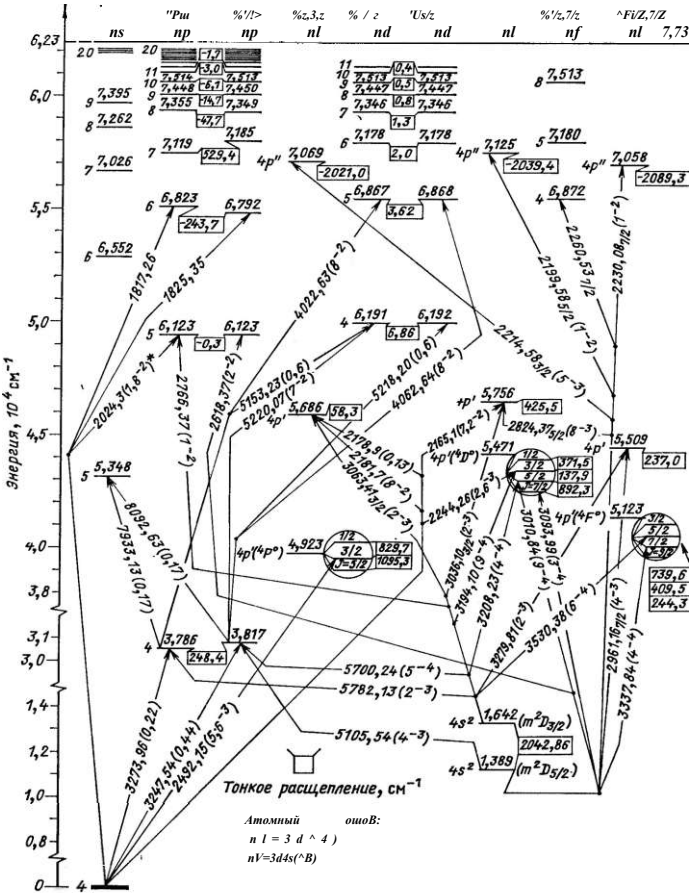
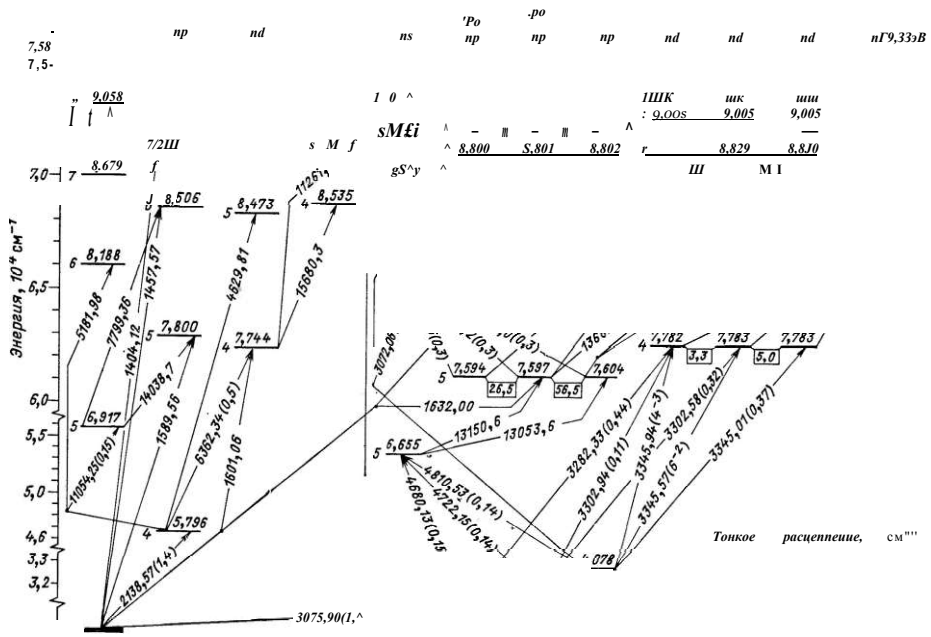


Рис. 32.30. Диаграмма Гротриана для атома меди



Тонкое расщеплеше, см"'

Рис. 32.31. Диаграмма Гротриана лля атома иинка

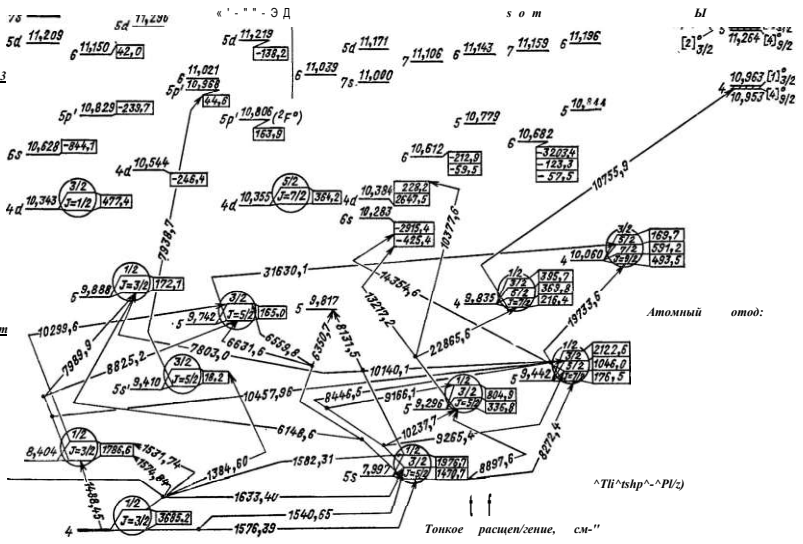


Рис. 32.32. Диаграмма Гротриана для атома кобальта

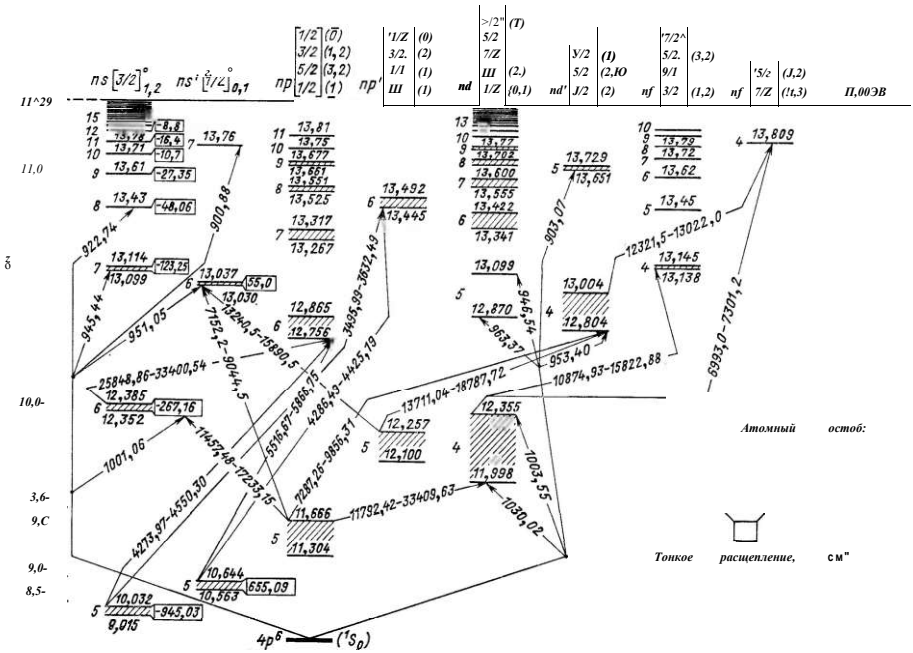


Рис. 32.33. Диаграмма Гротриана для атома криптона

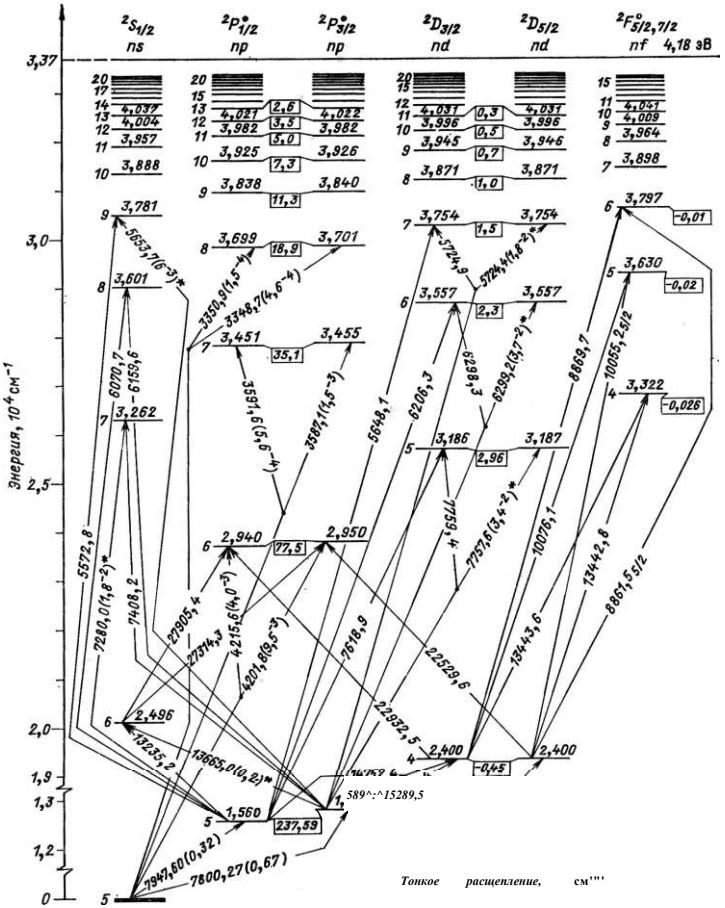


Рис. 32.34. Диаграмма Гротриана для атома рубидия

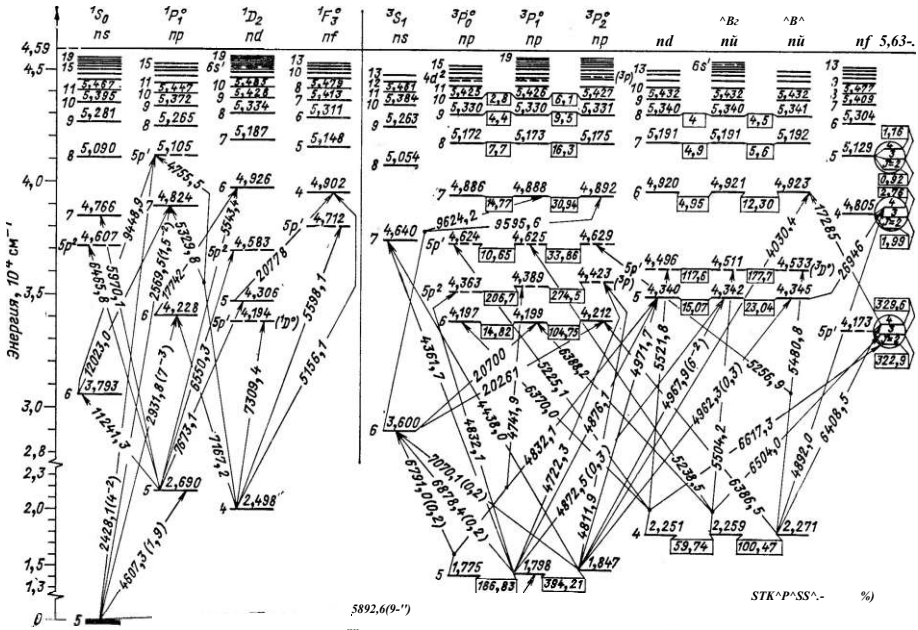


Рис. 32.35. Диаграмма Гротриана для атома строиция

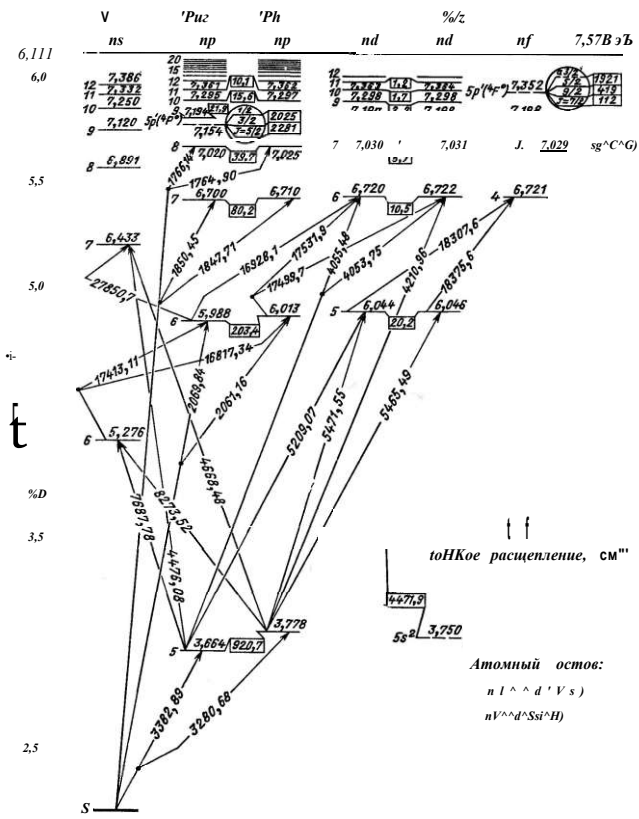


Рис. 32.36. Диаграмма Гротриана для атома серебра

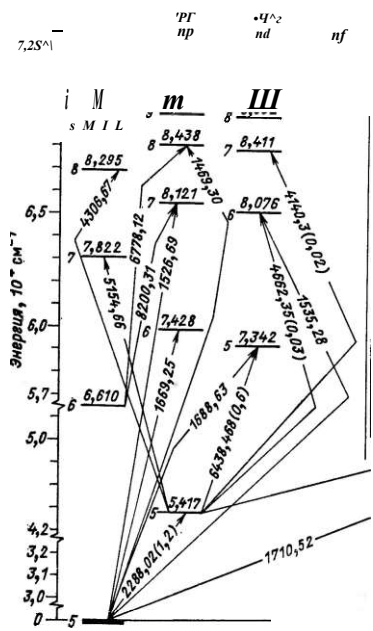
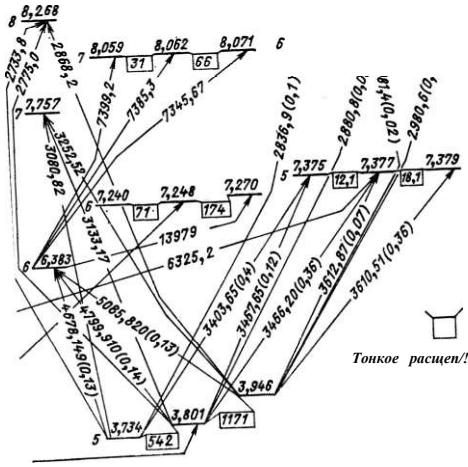


Рис. 32.37. Диаграмма Гротриана для атома стронция

пр

« S ^ f e



*Тонкое расщеп/!ение^* см

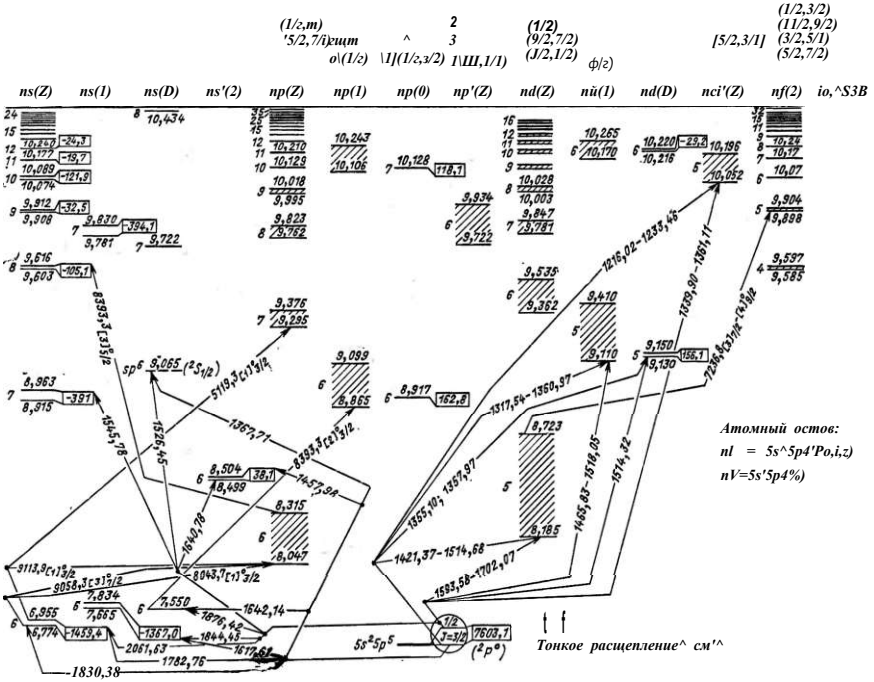


Рис. 32.38. Диаграмма Гротриана для атома кобальта

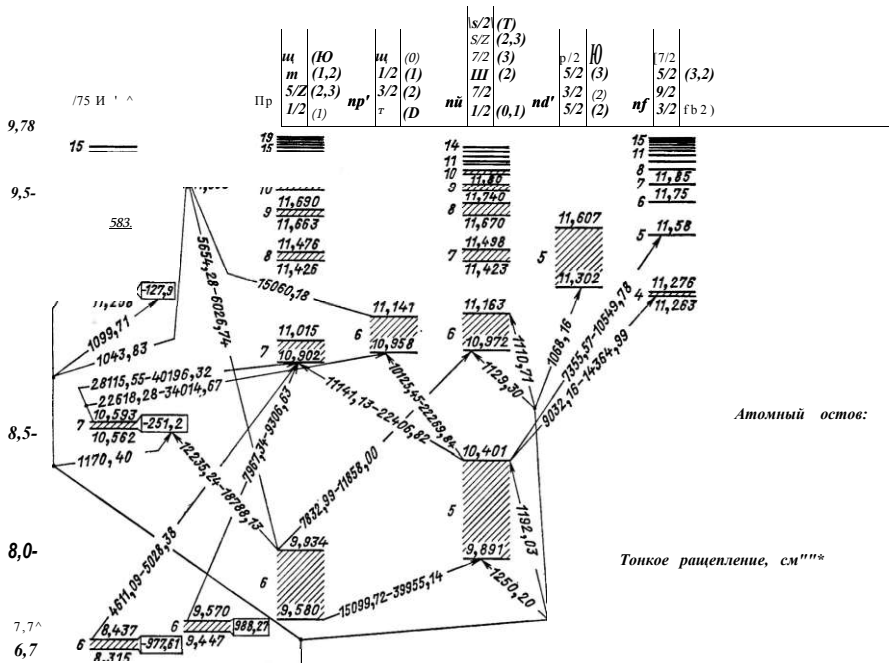
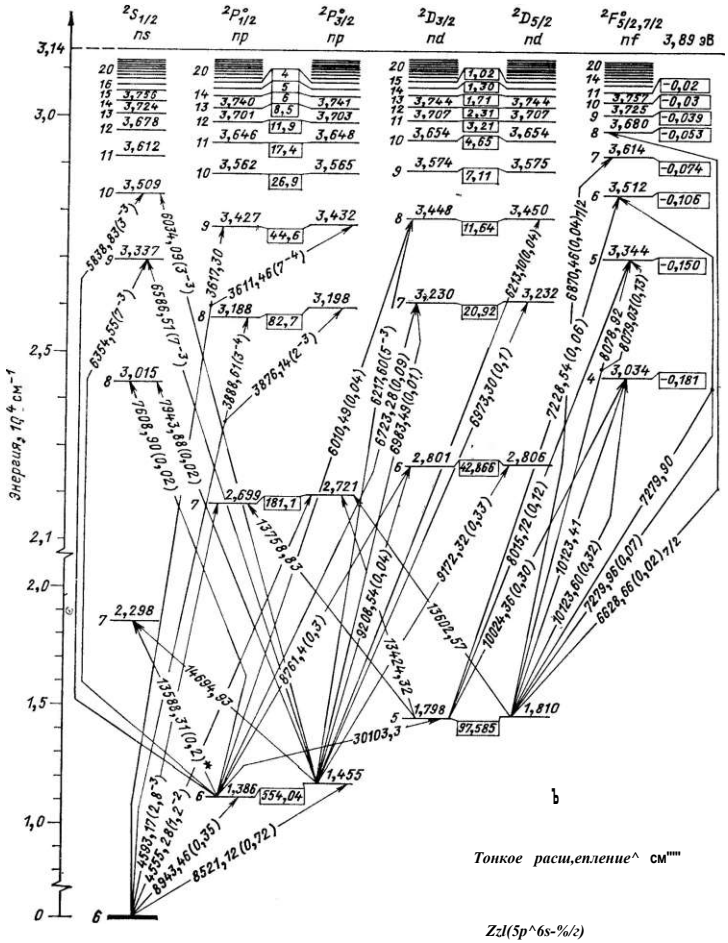


Рис. 32.39. Диаграмма Гротриана для атома кобальта



814
Рис. 32.40. Диаграмма Гротриана для атома цезия

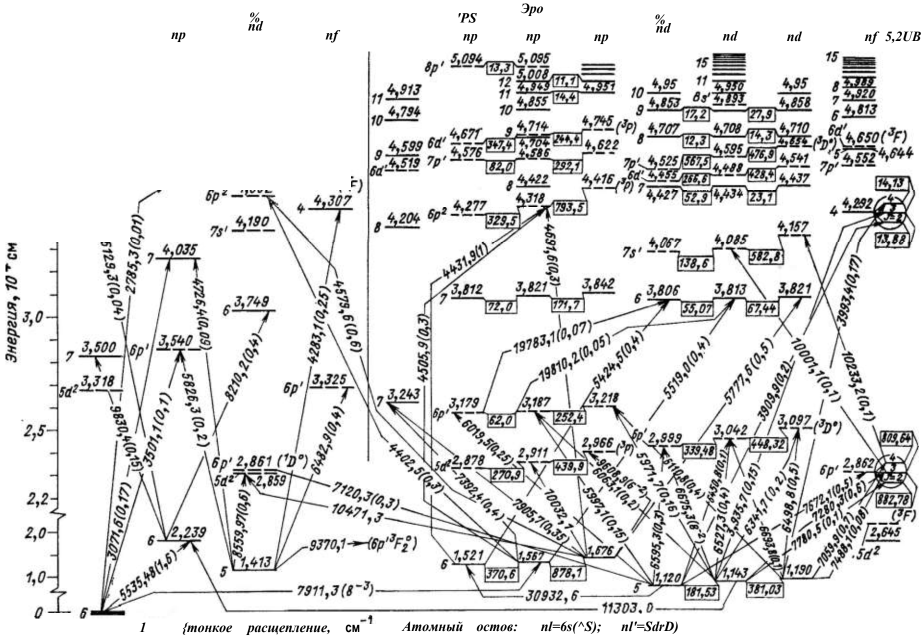


Рис. 32.41. Диаграмма Гротриана для атома бария

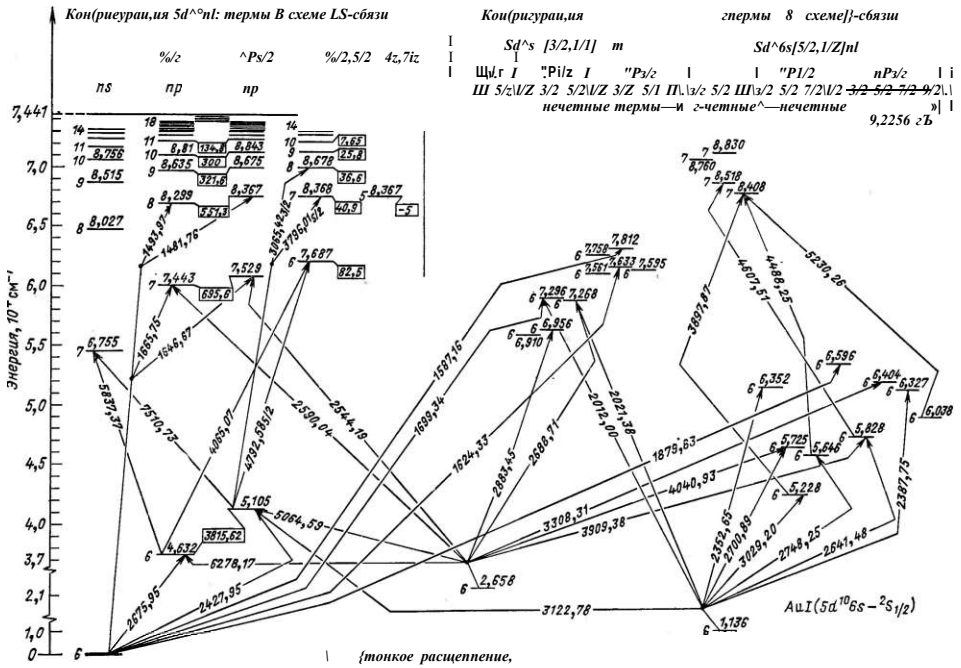


Рис. 32.845. Диаграмма Гротриана для атома стронция

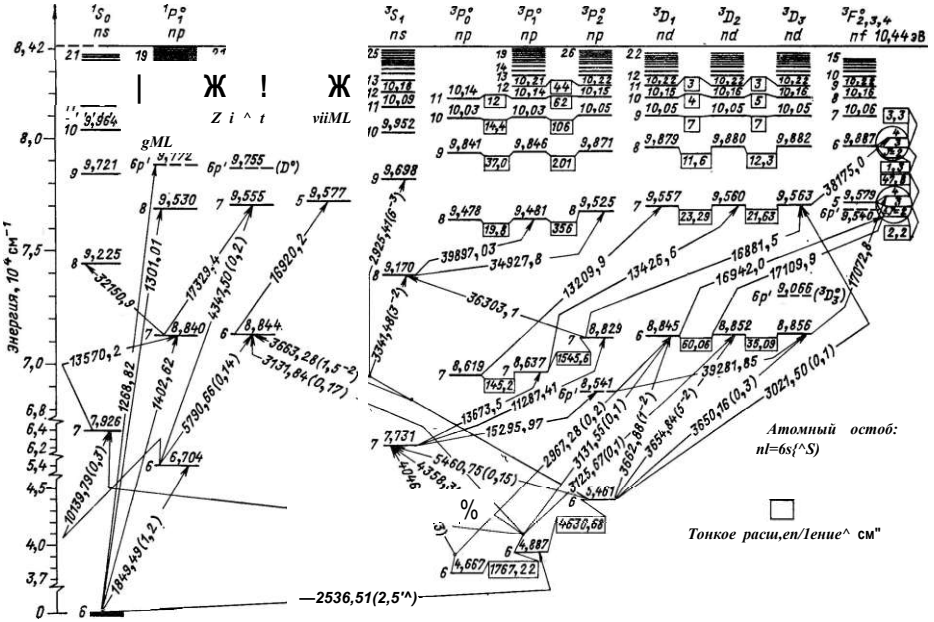


Рис. 32.846. Диаграмма Гротриана для атома стронция

же диаграммами Гротриана) для первых 30 элементов таблицы Менделеева, ряда атомов с валентной электр0Ш10й оболочкой вида ***ns, ns% пр"*** и пр® (п=5,6) и простейшего иона — Не+, интересных с точки зрения современных приложений атомной спектроскопии. Диаграммы дают наглядное представление о характере распределения возбужденных состояний по основным электронным конфигурациям атомов и содержат информацию о наиболее интенсивных переходах в их оптических спектрах.

При построении диаграмм Гротриана **мы** исключили из рассмотрения слишком высокие ридберговские уровни энергии и автоионизационные состояния, отвечающие двухэлектронному возбуждению и лежащие выше ионизационного предела атома. Положение атомных уровней энергии (под ними подразумевалось обычно положение центров тяжести мультиплетов T^ITigijUgi, где 7г — компонента мультиплета, g, — статистический вес i-го подуровня) определяется по шкале ординат в обратных сантиметрах, кроме того, цифры над горизонтальными линиями уровней обозначают соответствующее значение энергии возбуждения в электрон-вольтах **(1** эВ=8065, **54 см"').**

Рядом с линиями уровней в прямоугольной рамке приведены значения энергии расщепления мультиплетных уровней с нужным знаком, характеризующим либо нормальный (+), либо обращенный (—) мультиплет. Штриховые метки использовались для обозначения электронных конфигураций, отвечающих разным исходным состояниям атомного остова. В случае атомов инертного газа и атома нода, у которых возбужденные состояния классифицируются по схеме /(-связи моментов, на диаграммах Гротриана были указаны только положения нижней и верхней компонент мультиплетных подуровней (отмеченных соответственно чертой снизу и сверху при символе квантового числа / полного момента атома) и граничные длины волн переходов между заданными мультиплетными уровнями.

В некоторых случаях рядом с числовым значением длины волны перехода Я (в ед. 10-"> м) приведены в круглых скобках значения соответствующей силы осцилляторов в поглощении fik. С помощью нижнего индекса у Я и fik отмечалось значение квантового числа / полного электронного момента состояния (нижнего, верхнего или обоих вместе), обладающего мультиплетной структурой.

При построении комбинированных диаграмм атомных уровней энергии и спектров на рис. 32.1—32.43 были использованы специальные руководства по диаграм-

Таблица 32.2. Поправка Ю-" м, к длине волны л, 10-1" м, учитывающая дисперсию света в воздухе: >^вод = W - W = >^вод + ДХ

X	" 11 >		дх	X	ДХ
2000	0,648	3400	0,976	4800	1,34
2100	0,667	3500	1,00	4900	1,37
2200	0,687	3600	1,03	5000	1,39
2300	0,708	3700	1,05	5200	1,45
2400	0,731	3800	1,08	5400	1,50
2500	0,754	3900	1,10	5600	1,55
2600	0,777	4000	1,13	5800	1,61
2700	0,801	4100	1,16	6000	1,66
2800	0,825	4200	1,18	6200	1,72
2900	0,850	4300	1,21	6400	1,77
3000	0,875	4400	1,24	6600	1,82
3100	0,900	4500	1,26	6800	1,88
3200	0,925	4600	1,29	7000	1,93
3300	0,950	4700	1,32	7200	1,98

Продолжение табл. 32.1

X	ДХ	1 ^		ДХ	1 •		ДХ
7400	2,04	10 600		2,90	13 800		3,77
7600	2,09	10 800		2,96	14 000		3,83
7800	2,15	11 ООО		3,01	14 200		3,88
8000	2,20	11 200		3,07	14 400		3,94
8200	2,25	11400		3,12	14 600		3,99
8400	2,31	11 600		3,18	14 800		4,05
8600	2,36	11800		**3,23**	15 ООО		4,10
8800	2,42	12 000		**3,28**	1 16 ООО		4,37
9000	2,47	12 200		3,34	17 000		4,64
9200	2,52	12 400		3,39	18 000		4,92
9400	2,58	12 600		3,45	i 19 000		5,19
9600	2,63	12 800		3,50	11 20 000		5,46
9800	2,69	13 000		3,56	30 000		8,18
10 000	2,74	13 200		3,61	11 40 000		10,9
10 200	2,80	13 400		3,66	1 50 000		13,6
10 400	2,85	Ш	13 600	3,72	11 100 000		27,3

мам Гротриана [I, 2], многочисленные журнальные публикации по спектрам отдельных элементов [3], таблицы спектральных линий [4, 5] и справочные издания по вероятностям оптических переходов (см. литературу в [31). Погрешности в определении величин Г, и fik были учтены при округлении значащих цифр в пределах ±1 для последней приведенной цифры.

Стоит напомнить, что согласно принятому в спектроскопии соглашению все длины волн переходов с Я>200 нм относят к переходам в воздухе, а более короткие длины волн — к переходам в вакууме. В табл. 32.2 приведены значения поправки АЯ к длине волны, учитывающей дисперсию света в воздухе по стандартной формуле Эдлена [3]-

$$= >^{\text{вак}} - >^{\text{возд}} = \qquad (I - «-'),$$

$$„ = 1 \text{ -I- } 10\text{-}8 \quad 8342{,}13 + \frac{2.406030\text{-}10\text{-}^{\wedge}}{1{,}3\text{-}10\text{-}"\text{-}=^{\wedge}} + \frac{1{,}5997\text{-}10\text{-}^{\wedge}}{0{,}389.10\text{-}8\text{—}o}$$

здесь *п* — показатель преломления воздуха для рассматриваемой волны; о — волновое число в вакууме, равное энергии перехода АГ/Л, см-». В практических единицах связь между длиной волны перехода и энергией перехода имеет вид

$$Хвак = 1О8/ДГ1 = 12398{,}5/Д7'2,$$

где Л выражено в Ю"'" м, АТi — в см-' и АГг — в эВ,

32.3. ТОНКАЯ СТРУКТУРА УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМОВ

Хорошо известно, что систематика уровней энергии и спектров многоэлектронных атомов строится на основе учета в модели самосогласованного (эффективного центрально-симметричного) поля атома дополнительных возмущений от нецентрального электростатического и релятивистских (спин-орбитального и спин-спинового) взаимодействий электронов. В нерелятивистском приближении при учете только электростатических взаимодействий энергетические уровни атома характеризуются значениями полного орбитального (Z,) и спинового (S) моментов электронов и вырожде-

ны по возможным направлениям векторов **L** и **S** в пространстве.

Если учесть зависящие от спинов электронов релятивистские взаимодействия, то, строго говоря, уровни энергии атома должны характеризоваться лишь значениями сохраняющегося полного электронного момента **J = L**-fS, поскольку каждый из моментов **L** и **S** в отдельности не сохраняется. При относительной малости релятивистских эффектов по сравнению с электростатическим взаимодействием электронов их можно рассматривать по теории возмущений и тогда уровень энергии с заданными значениями ***LS*** расщепляется на ряд компонент, отличающихся значениями квантового числа ***J{\L—S\<J<.L+S).*** Так возникает тонкая структура уровней — каждый уровень характеризуется набором квантовых чисел ***LSJ.***

Если принять во внимание взаимодействие орбитальных и спиновых моментов электронов, то интервалы между соседними компонентами расщепленного уровня, которым отвечают значения полного электронного момента / и / — 1, можно представить в виде [6]:

$$AEj \quad — \quad = /U,$$

где А — постоянная спин-орбитального взаимодействия, зависящая от электронной конфигурации и от ***L*** и S. Этой формулой выражается правило интервалов Ландё в приближении ***18-связи*** моментов, когда интервалы тонкой структуры малы по сравнению с разностями энергий уровней с различными ***L, S.*** Постоянная ***А*** может быть как положительной, так и отрицательной, и в соответствии с этим заданный мультиплет называют либо нормальным (его нижней компоненте отвечает минимальное значение ***J—\L—S),*** либо обращенным (нижней компоненте отвечает максимальное значение ***J^L+S).***

Измеренные значения энергии расщепления соседних компонент низколежащих мультиплетов атомов приведены на рис. 32.1—32.43. Как правило, приближение /.5-связи подходит для описания не слишком сильно возбужденных уровней энергии атомов из начала и середины таблицы Менделеева. Погрешности определения энергии тонкого расщепления уровней были учтены при округлении значащих цифр в пределах ±1 для последней цифры.

32.4. СВЕРХТОНКАЯ СТРУКТУРА УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМОВ

Взаимодействие атомных электронов с мультипольными моментами ядра (магнитными и электрическими) приводит к расщеплению уровней энергии, характеризуемых полным электронным моментом на ряд сверхтонких компонент. Каждая такая компонента определяется набором из четырех квантовых чисел ***J, /, F, Шр,*** где / — спин ядра, **F = J - f1** — полный угловой момент атома (\ J — m r — проекция полного момента на выделенное направление в пространстве.

Основную роль в сверхтонком расщеплении уровней играет взаимодействие электронов с мультипольными моментами ядра наинизших порядков — магнитным дипольным и электрическим квадрупольным моментами. В первом приближении моменты J u l можно считать сохраняющимися и тогда полная энергия уровня записывается в виде суммы [7]:

$$-f \wedge B \qquad \frac{-//((K \pm 1) - \sim / (/ - M) / (/ \pm 1)}{8 \qquad \text{Ê} \qquad / (2/ — I) J (2J - 1)} \qquad /,$$

где El — энергия уровня без учета взаимодействия электронов с ядерными моментами; ***Emx*** — энергия взаимодействия электронов с магнитным дипольным моментом ядра; ***Ee2*** — энергия взаимодействия электронов с электрическим квадрупольным моментом ядра. Далее, величина ***K=F(F+l)—l(l+l)—J(J+l)*** и, наконец, ***А, В*** — параметры сверхтонкого расщепления уровней, причем магнитное взаимодействие всегда превышает квадрупольное. Для состояний с электронным моментом /<1/2 (вследствие сферической симметрии в распределении электронного заряда) константа квадрупольного взаимодействия ***В*** обращается в нуль.

Сверхтонкое расщепление уровней принято обозначать в виде ^v(F, F')^^EFF < /H, где АЕ^-р, — расстояние между соседними компонентами с полными моментами ***F*** и ***F'=F***—1, измеренное в отсутствие внешнего магнитного поля. Зависимость величины Av от параметров сверхтонкого расщепления ***А к В*** имеет вид

В табл. 32.3 представлены измеренные значения энергии сверхтонкого расщепления Av(f, ***F'),*** а также значения параметров ***А, В*** для ряда слабовозбужденных уровней атомов [3, 7—9]. Погрешности в определении искомых величин сверхтонкого расщепления уровней были учтены нами при округлении значащих цифр в пределах ±1 для последней приведенной цифры.

Таблица 32.3. **Сверхтонкое расщепление низколежащих уровней атомов**

Атомный номер *Z*	Изотоп, терм основного	Терм	Квантовые числа момента (F, F')	Свеохтонкое расщепление уровней	
			Av(F, F'), A, B, МГц	ДЯ (F, F'). Io-^' см-1	
1	^*н* 1/2	1	(1.0)	1420,40575	47,3796
			(1,0)	177,5568	5,92266
	'Hes„^), 1		(3/2,1/2)	327,38435	10,9204
			(3/2,1/2)	40,9244	1,36509
	^H^Sy^), 1/2		(1.0)	1516,70147	50,5917

Продолжение табл. 32.1

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра /	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				Л, В, МГц	10-' см-'
2	='He(iS„), 1/2	2 3S,	(3/2, 1/2)	6739,701	224,812
			(5/2, 3/2)	6960	232,2
			(3/2, 1/2)	4510	151
	"He+C^Si/g), 1/2	1 ^Sl/2	(1,0)	8665,6499	289,055
3	1		(3/2, 1/2)	228,20526	7,61211
				-4=17,37	—
				-4= -1,16	—
				B = - 0 , 1	
	'Li^Si/g). 3/2		(2,1)	803,50409	26,80203
				.4=45,9	—
		2^/^3/2		Л = - 3 , 0 6	
				B = - 0 , 2	
4	sBe(iS„), 3/2		(5/2, 3/2)	354,44	11,823
			(3/2, 1/2)	202,95	6,7697
			(7/2, 5/2)	435,48	14,526
			5/2, 3/2)	312,02	10,408
Б	3		3/2, 1/2)	187,62	6,2583
	3/2		7/2, 5/2)	429,05	14,312
			(2,1)	732,15	24,422
			(3,2)	222,7	7,428
			(2,1)	144,0	4,803
			(1,0)	71	2,37
6	1/2		(3/2, 1/2)	4,3	0,14
7	"N(^53/2). 1	2»P2	(5/2, 3/2)	372,6	12,43
				Л= 10,45093	
8	"0(^2), 5/2			B=1,3	
				Л=-219,6	
9	1/2	^ ^3/2	(2,1)	Л=4,7	
				4020	134
			(1,0)	10250	342
10	2iNe(iS„),3/2		(7/2, 5/2)	1034,5	34,51
			:5/2, 3/2)	599,4	19,99
			(3/2, 1/2)	303,9	10,14
11	3/2		(2,1)	1771,62613	59,09513
				Л=94,3	—
				-4=18,7	—
				B=2,9	
12	26MgeS„), 5/2	3^P^	(7/2, 5/2)	516,1	17,22
			(5/2, 3/2)	350,0	11,7
		з з р.	(9/2, 7/2)	567,3	18,92
			(7/2, 5/2)	452,3	15,09
			(5/2, 3/2)	329,0	10,97
			(3/2, 1/2)	199,8	6,66
13	5/2	3^Л/2	(3,2)	1506,1	50,24
			(4,3)	392	13,1
			(3,2)	274	9,14
				-4=420	
15	«P(<'5з/2), 1/2			Л=55,06	
17	зб[] (^^3/2).3/2		(3,2)	670,0135	22,349
			(2,1)	355,2210	11,849
			(1,0)	150,1736	5,009
			(2,1)	2074,38	69,19
	«'C1ePз/2,)3/2	^'Рз/2	(3,2)	555,3043	18,523
			(2,1)	298,1277	9,944
			(1,0)	127,4408	4,251
		3^Л/2	(2,1)	1726,7	57,60

Продолжение табл. 32.1

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного	Терм	полного момента F)	Сверхтонкое расщепление уровней	
				Л, В, МГц	
19	3/2		(2,1) —	461,71972 Л=27,8	15,40132
			—	Л=6,1 В=2,8	—
			—	285,73	
	^"K 4		— —	Л=—34,5 Л=-7,5	—
	«KC'Si/s), 3/2		(2,1) —	В=—3 254,01387 15,2	8,47300
			—	Л = 3,4 в = з,з	
20	"Ca eSo), 7/2		-	XI = -240,7 В = 4	—
	*3Ca(»So), 7/2		-	/1 =—198,8 В = 3	-
21	**«Sc^Dg/g), 7/2**		(5,4) (4,3)	1329 1085,8	**44,3** **36,22**
			5,4 (4,3)	635,0 543,8 444,7	21,18 **18,14** **14,83**
			—	= 158,5 В = -5,2	
			—	Л = 154,0 В = —6,5	-
			—	Л =250,0 В = -9,1	
		4^^9/2	—	Л = 286,0 В = — 15	-
22	«Ti№), 5/2		—	Л = —85,703 В= 25,70	
	7/2		-	-4= —85,726 В = 21,07	—
23	7/2	3^^3/2	—	Л = 560,07 В =3,98	-
			—	/1 = 751,53	
			—	Л = 405,64 В = —7,0	-
			—	Л = 373,53 В =—5,0	-
			—	Л = 382,37 В=2,3	-
24	**бзсг**('5з), 3/2	3'5з	(9/2, 7/2) (7/2, 5/2)	371,7 289,09	**12,40** **9,643**
25	5/2		(5/2, 3/2)	206,50 Л = —72,4208 В = —0,018	**6,888**
		4 "^9/2	-	Л = 510,3 В=- 132,2	-
			—	Л = 458,9 В =21,7	-
			-	Л = 436,7 В = -46,8	-
			—	**Л = 469,4** **8^-65,1**	—
26	1/2		—	**Л =882,1** Л = 38,08	
		4bf6	—	Л = 87.25	—

Продолжение табл. 32.1

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра J	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
					ΔE (F,F'), 10^{-3} см$^{-1}$
		4 ^ 3	—	A = 78,43	—
			–	Л = 69,63	–
			–	A = 55,99	–
27	7/2		(8,7)	3655	121,9
			(7,6)	3169,4	105,7
			(6,5)	2695	89,9
			(5,4)	2230,6	74,40
			(4,3)	1774,5	59,19
28	«Niff^), 3/2			>1 = —215,04	
				B = —56,9	
29	«"Си eSi^^), 3/2		(2,1)	11733,8174	391,398
	3/2		(2,1)	12568,780	419,250
30	«Zn(iS„), 5/2		(9/2, 7/2)	2418,1	80,66
			(7/2, 5/2)	1855,7	61,90
			(5/2, 3/2)	1312,1	43,77
			(3/2, 1/2)	781,9	26,08
31	MGa eP,/2),3/2		(2 Л)	2677,987	89,328
			–	A = 190,794	—
			–	B = 62,522	
			(2,1)	2140	71,3
	3/2		(2,1)	3402,69	113,50
			(3,2)	766,696	25,574
			(2,1)	445,470	14,859
			(1.O)	203,043	6,773
32	'3Ce(3p„), 9/2		(2,1)	2720	90,6
				.4 = 15,55	
				B = —54,57	
			–	A = -64,427	
				B = 111,8	
83	3/2		—	/4 = -66,20	–
				B = -0,53	
				819,45	27,33
				595,12	19,85
36	8='Kr(iSe), 9/2			Л = -143,0	
37	«^Rb (=5,/2), 5/2		(3,2)	3035,732	101,261
			—	Xl = 120,7	—
			—	Л = 25,0	
				B = 26,0	
			—	A = -5	—
			—	Л = 7	—
			—	A = 239	—
	"Rb 3/2		(2,1)	6834,6826	227,98
			—	Л = 406	
			—	A = 84,9	-
				B = 12,6	
			—	Л = —17	—
			—	/4 = 25	—
			–	Л = 810	
39	1/2	4^^3/2	—	Л= —57,2	—
			—	Л = —28,8	
42	5/2	5'S3	-	A = —208,5828	
				5 = 0,0087	-
			-	**Л = 428,84**	.
				B = 0,028	
	"Mo ('S3), 5/2		—	**Л = -212,9817**	—
			—	Л = 437,89	
47	1/2			Л = -32	—

Продолжение табл. 32.1

Атомный номер *Z*	Изотоп, теры основного состояния, спин ядра *I*	Терм	Квантовые числа полного момента (F, *F'*)	Сверхтонкое расщепление уровней	
				Av (f. *F'*). *A. B.* МГц	Дf (f. F'), Ю-» см-'
	9/2		(5,4)	11385	379,8
			(5,4)	8410	281
	9/2	/2		*A* = 2281 955	
			—	/4 = 242,165	—
			(5,4)	8430	281
	7/2		(5,4)	815,6	27,20
			(4,3	648,5	21,63
			(3,2)	484,0	16,1
	1/2		—	/4= -1010,3	—
				-4 = 782,5	
		5 ' A	_	*A* = -2887,0	_
	5/2		(4,3)	4226,17	140,97
			(3,2)	1965,9	65,58
			(2,1)	737,49	24,60
	i2eXe(iS„), 1/2		(5/2, 3/2	5961,258	198,85
	и»Xe(>5„), 3/2		(7/2, 5/2	2693,623	89,850
			(5/2, 3/2	1608,348	53,649
			(3/2, 1/2	838,764	27,978
	7/2		(4,3)	9192,63177	306,63342
				A = 292	—
		б^Р.	—	4 = 50,3	—
				e = —0,4	
		5	—	*A*= 16,3	—
			—	***A* = —22**	—
			-	***A* = 550**	_
	i36BaeS„), 3/2			*A* = —470	
				B = 12	
				4 = 371	
				B = 18	
				A = 408	
				B = 20	
		5		Л = —73,4	
				B = 38,7	
	is'Ba('Se), 3/2		—	*A* = —520	—
				B = 17	
		5		Л = 414	
				B = 27	
				Л = 455	
				B = 40	
			—	4 = —82,2	-
				B = 59,6	
	"BLafDg/g), 7/2	'3/2	(5,4)	737,97	24,62
			(4,3)	551,98	18,41
			(3,2)	391,6	13,06
		5	(6,5)	1120,90	37,39
			(5,4)	912,79	30,45
			(4,3)	716,29	23,89
			(3,2)	529,1	17,65
			(5,4)	2390,6	79,74
			(4,3)	1925,5	64,23
			(6,5)	1808,9	60,34
			(5,4)	1503,2	50,14
			(4,3)	1199,8	40,02
			(4,3)	9840,6	328,2
			(4,3)	3707,8	123,68
			(4,3)	3216,5	107,3

Продолжение табл. 32.1

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				Av (F, F'). A. B. МГц	ДЕ (F, F'),
59	шPre/9/2), 5/2	**4^/9/2**	—	Л = 926,209 В = —11,88	
			—	Л = 730,393 *B* — —11,88	—
			—	Л =613,240 В = -12,85	.
			—	Л = 541,575 В = -14,56	—
60	i«Nd(6/4), 7/2	4	(15/2, 13/2) (13/2, 11/2) (11/2, 9/2) (9/2, 7/2) (7/2, 5/2)	1418 1257,5 1084,7 901,5 710 Л =-153,68 В = 115,7	47,3 41,95 36,18 30,07 23,7
	»«Nd(6/4), 7/2	4^/4	—	Л = -121,63 В = 64,6	—
		4ь/6	.	Л = -95,53 В =61,0	.
62	i«Sm('fe), 7/2	4'fi	.	Л = —33,494 В =-58,692	.
		4'fa	.	Л = -41,184 В = —62,23	—
		4'f3		Л = -50,240 S = -33,68	—
	i«Sm('f„), 7/2	4'f,	.	Л = -27,611 В= 16,962	—
		4'fa	—	Л = —33,951 В = 17,99	—
		4'fa	—	Л = -41,418 В = 9,75	
63	isiEU(8S7/2), 5/2		(6,5) (5,4) (4,3)	120,67 100,29 80,05	4,025 3,345 2,67
	5/2		(6,5) (5,4) (4,3)	54,04 44,00 35,00	1,803 1,47 1,17
64	«^GdCDO, 3/2	**5SD2**		*A* = 36,575 В = 179,4	—
			—	*A* = 4,92 *B* = —406,67 Л = -6,86 *B* = —352,8	—
	ib7Gd(sD2), 3/2	***5Ю,***	—	Л = 47,96 В = 191,2	—
		S'Ds		Л =6,45 В = -433,2	
		5 "Da	—	Л = -9,00 В = —375,9	—
65	i59Tb(«//i5/2), 3/2		–	*A* = 673,75 *B* = 1449,3 Л = 682,91 6= 1167,5 *A* = 532,20 В = 928,9	—
		5«C.**З**У2	-		
66	s"Dy(b/g), 5/2	4®/g	-	Л = -116,232 В= 1091,57	—
	5/2	4b/e	—	Л= 162,7543 В= 1152,86	—

Продолжение табл. 32.1

			Квантовые полного *(F, F')*	Сверхтонкое расщепление уровней ДЕ (f, *F'),*	
				/4 = 177,53 B = 1066,4	—
	7/2			7184,8	239,7
				6540,8	218,2
				5842,4	194,9
				5096,3	170,0
			(5,4)	4309,3	143,7
	7/2	4 3Я,		/4 = —120,486 e =-4552,96	–
	1/2		(4.3)	1496,5507	49,920
				A = —374.13766	–
	I'^LufDg/g), 7/2		(5.4)	2051,2201	68,421
			(4,3)	345,497	11,524
			3.2)	496,578	16,564
			6,5)	1837,570	61,295
			5,4)	800,343	26,70
			4.3)	161,815	5,398
			(3,2	157,73	5,26
			(2,1	238,058	7,941
	""LU^g/g), 7			Л = 137,9 e = 2131	–
				A = 104,0 ***B*** = 2624	–
	"'HRffa), 7/2		(11/2,9/2)	991,792	33,08
			(9/2, 7/2)	477,008	15,91
			(7/2, 5/2)	162,887	5,433
			(5/2, 3/2)	4,864	0,16
	9/2	53F,	(13/2, 11/2)	82,132	2,74
			(11/2,9/2)	392,848	13,104
			(9/2,7/2)	541,9104	18,076
			(7/2, 5/2)	558,672	18,635
	7/2			Л = 509,08 B = —1012,24	–
				Л = 313,47 B = —834,8	—
		5^^7/2		Л = 264,41 B = -787,5	—
		5 ^ / 2		Л = 256,62 B = —650,4	—
				Л = 884,17	—
				Л =379 B = -1350	—
	i83W(bDo), 1/2			Л = 29,12	–
				Л =505,6	–
				Л = 56,3	–
		5^£>3		Л ='78,0	–
75				Л = 88,3	—
	5/2			Л = -56,596 B = 29,635	–
				Л = 880,44	—
		56D4		B= 1618,5	
	M'Re(«S5/2), 5/2			Л = —57,149 B = 28,05	—
				Л = 889,24 B = 1531,7	–
		5 "55/2		***A*** = 2600 B = 2000	—

Продолжение табл. 32.1

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра /	Терм	Квантовые числа полного момента (F: F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				Д^ A. B. (F,F'), МГц	AE(F, F'). Ю-" см-'
77	3/2		(6,5)	659,265	21,991
			(5,4)	189,440	6,319
			(4,3)	84,050	2,804
	3/2		(6,5)	660,090	22,018
			(5,4)	224,478	7,488
			(4,3)	33,535	1,119
78	196pt(3£)3), 1/2	*SWs*		Л = 5702,6	—
			—	.4 = 2609,6	—
			(9/2, 7/2)	3820,56	127,4
79	3/2		(2,1)	6099,320	203,452
			—	Л = 80,24	—
				В = 1049,8	
			—	Л = 199,842	—
				5 = 911,077	
80	MsHg(iS„), 1/2		—	Л = 9066,45	
	2«Hg(iS„), 3/2		(7/2,5/2)	11382,629	379,68
			(5/2, 3/2)	8629,522	287,85
			(3/2, 1/2)	5377,49	179,37
		6 Юз		*A* = -2450	
				В = 60	
81	^*niePi/2),* 1/2		(1,0)	21105,45	704,0026
			(2,1)	524,0599	17,4808
	20511 (^P,/2), 1/2		(1.0)	21310,83	710,8534
			(2,1)	530,0765	17,6815
82	1/2	**6 IDs**	(5/2, 3/2)	1524,5	50,85
83	9/2		—	Л = -446,94	
				В = -304,65	
			—	Л = -1227	
				В = -620	
			—	Л ^ 2503	-
				В = 0	
			—	Л = 11268	
			—	Л = 491,03	
				В = 978,64	
92	7/2		—	Л = -60,56	—
				В = 4104,1	
			—	Л = -68,35	—
				В = 40,1	
93	5/2		—	Л = 778	—
				В = 645	

32.5. ИЗОТОПИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА АТОМНЫХ СПЕКТРОВ

В спектрах элементов, обладающих определенным изотопным составом, наблюдают расщепление линий на ряд компонент, каждая из которых характеризует свой нуклид. Возникновение подобной изотопической структуры спектров обусловлено взаимодействием электронов с ядром. Полный гамильтониан взаимодействия атома в системе центра иперции включает в себя движение нуклонов ядра относительно центра инерции (нормальный или боровский эффект массы), зависящее от массы кдра обменное взаимодействие электронов (специфический эффект массы) и взаимодействие валентных электронов с распределенным протонным зарядом ядра (эффект конечности объема ядра). В итоге наблюдаемое изотопическое смещение в спектральных линиях 6v для двух изотопов элемента с массовыми числами Ai и A^ *{A=Z+N, Z* — число протонов, *N* — число нейтронов) представляется суммой трех слагаемых [10]

BMS SS **VS**

в приведенном выражении первый члеи = =r'oc/Пе(Л12 — Mi)/MiM2 характеризует нормальное массовое смещение, наиболее важное для легких элементов (2<:30), причем Voo — частота излучательного перехода при бесконечной массе ядер; гпе — масса электрона; Ml, Мг — массы ядер; ^V g^'— специфическое мас^

совое смещение; 6v — объемное смещение между линиями двух изотопов, доминирующее в спектре тяжелых элементов (Z>60). В спектрах элементов середины таблицы Менделеева 20-^-25) наблюдаемое изотопическое смещение мало по абсолютной величине.

Изотопический сдвиг в спектральных линиях 6v обусловлен смещением электронных термов атомов и связан с изотопическими сдвигами верхнего (бГ') и нижнего (67") термов соотношением

$$\mathbf{Bv = BT'' — BГ.}$$

Изотопический сдвиг условно принято считать положительным, если линия перехода для более тяжелого изотопа сдвинута в сторону больших частот. На языке сдвига термов это означает, что отрицательный знак смешения термов соответствует случаю, когда уровень более тяжелого изотопа лежит глубже (его расстояние до границы непрерывного спектра больше) уровня более легкого изотопа. Нормальный массовый эффект приводит к росту энергии связи электрона в более тяжелом изотопе, тогда как вследствие эффекта конечности объема ядра энергия связи электронов меньше для изотопов с большей массой; в итоге эффекты объема и массы ядра противоположны по знаку. При наличии сверхтонкой структуры атомных уровней изотопический сдвиг термов определяется по расстоянию между центрами тяжести компонент сверхтонкой структуры.

в табл. 32.4 включены значения изотопического сдвига 6v резонансных линий для ряда элементов |10—13]. С учетом установленной погрешности измерений числовые значения были округлены по последней значащей цифре (±1).

Таблица 32.4. Изотопическое смещение резонансных линий атомов

Атомный номер 2	Элемент (основной терм)	Переход между термами	Длина волны Л, 10-»» м	Массовые числа изотопов At—A^	ние линий 10-" см->
1	И		1215,7	1—2 1—3 2 - 3	2,238-10^ 2,983-10* 7,477-103
2	Не	**I'So—**	584,3	3 - 4	8,8-103
3	**Li**		6708	6 - 7	351,3
5	В		2497	10-11	-170
6		2p2 iS„-2p3s	2478,6	12—13	-160
7	N	3s «P3/2-3P	8629,2	14-15	70
		3s 'P5/2-3p'P5/2	8216,3	14—15	—60
8	**O**	3s "Si—Sp	8446,8	16—18	140
10	Ne	3s'[1/2];-3p[5/2k	7173,9	20-22	70
		3s[3/2];-3p[1/2h	7032,4	20-22	50
11	Na	3s	3303,0	23—24	24
12		3s' ***iS„-3s3pip;***	2852,1	24—25 24-26	50 60
18	Ar **(3se-iSo)**	4s[3/2]2-4p' [3/2h	7147,0	36—40	20
		4s' **[1/2]i-5p[1/2]o**	4510,7	36—40	50
19	K	4s	7699,0	39-40 39—41	4,19 7,85
		4s -P1,^	7664,9	39-40 39—41	4,22 7,88
20	Ca (4s2-**iSo**)	4s2 iSo—4s4p iPj	4226,7	40-42 40-43 40—44 40—48	13,0 20,4 25,7 50,4
		4s2 iSo—4s4p	6572,8	40-41 40—42 40-43 40—44 40-48	9,37 17.0 26.1 **33,2** 64,**1**

Продолжение табл. 32.4

Атомный номер Z	Элемент (основной терм)	Переход между термами	Длина волны Л, 10^{-10} м	Массовые числа изотопов A_1—A_2	Изотопическое смещение линий $Sv'^{\wedge}iA$, $10\text{-}S$ CMS
29			3274,0	63-65	**20**
30	Zn	4s2 iSe-4s4p iPi	2138,6	ДА = 2 (среднее значение)	**16**
31	Ga		4033.0	69-71	—1,1
36	Kr (4p« - iS„)	4p ^S,^	4172.1		- 1 , 3
	Rb	5s[3/2];-5p[5/2b	8776,7	82-84	2
37	(5s -	5s	7947,6	85-87	**2,6**
	Sr	5s =S,/2-5p ^P^/r	7800.2	85-87	**2,6**
38		5s2 iS„-5s5p iP^	4607,3	84-88 86—88	**9,0** **4,2**
		5s2 iSo-5s6p *ipl*	2931,8	87—88 84-88 86—88	**1,5** **15,9** **7,5** **8,0**
		5s2 iSo-5s5p *ир^*	6892,6	87—88 84—88 86-88 87—88	**14,1** **6,7** **2,7** - 1 2
40	Zr **(4d25s2 _ 3f**		4687,8	90-92 92—94 94-96	—7 —5
47			3382,9	107—109	- 1 5
			3280,7	107-109	- 1 5
48	Cd (5s2—iSo)	5s2 iSs-5s5p	3261,0	ДЛ = 2 (среднее значение)	—15
49	In	5p ^Si/2	4101,8	113—115	8,6
		5p	4511,3	113—115	8,5
54	Xe	6s[3/2];-6p[3/2b|	8231,6	134-136	- 3
55	Cs	6s ^S,/2-6p	8521,1	133—134 133-135	1,2 1,2
70	Yb	6s2 **is„**-6s6p **iPj**	3988,0	174—176 174—172	17 18
71	**Lu**	***5d6^*** ='D3,2-5d6s6p	5736,5	175—176	—13,1
			6055,0	175-176	—13,9
			5421,9	175-176	- 1 3 , 6
79	Au	6s ^S,/2-6p	2675,9	195—197 193—197 192—197 191—197 190—197	—100 —210 —280 - 3 2 0 —370
80		**iSe-6s6p зр;**	2536,5	198-199 198-200 199-201 200—**^202** 202—204	**—9** **- 1 6 0** **—210** **- 1 8 0** —160

Продолжение табл. 32.4

Атомный номер Z	Элемент (основной терм)	Переход между термами	Длина волны Л, 10-»» м	Массовые числа изотопов	Изотопическое смещение линий 10-3 см-1
81	TI		5350,5	203—205	-58,6
82	Pb		2833,1	207-208 206—208 204—208 202—208	-47 —75 -140 —207

32.6. СПЕКТРЫ ДВУХАТОМНЫХ МОЛЕКУЛ

Полосатые молекулярные спектры поглощения и излучения возникают при переходах между дискретными уровнями молекул. В точной постановке задача определения энергетических уровней молекулы не имеет решения и для учета взаимного влияния движения электронов и ядер, связи спиновых моментов с орбитальными и т. д. приходится опираться на приближенные методы, использующие характерные особенности внутримолекулярных взаимодействий Вследствие заметной разницы в массах скорость движения электронов в молекулах велика по сравнению со скоростью движения ядер и стало быть электроны и ядра вносят неодинаковый вклад в полную энергию молекулы. При этом оказалось возможным отделить проблему определения энергии, связаиной с движением электронов в поле ядер, от энергии еобственно ядерного движения и учесть методами последовательных приближений взаимное влияние электронной (характеризующейся относительно большой частотой переходов) и ядерной (характеризующейся относительно малой частотой переходов) подсистем в молекуле.

В итоге с практически достаточной во многих слу чаях точностью можно представить полную энергию двухатомной молекулы в заданном состоянии ***n*** в виде суммы

где Зр — электронная, а Гв/— колебательио-врашательная энергия; ***V, J*** — колебательное и вращательное квантовые числа молекулы соответственно. Для не слишком сильно возбужденных колебательных состояний в молекуле можно воспользоваться тем или иным разложением энергии Tvj в ряд по степеням квантовых чисел V и /, например в виде,

$$G\ (V) \text{ -f } F^{\wedge}\ (J) = [\text{co},\ (v + l/2) -$$

В приведенном выражении колебательная энергия молекулы ***C(v)*** соответствует модели так называемого ангармонического осциллятора, причем Ые — частота гармонических колебаний, ыл — постоянная ангармонизма. Вращательная энергия молекулы ***F„(J)*** соответствует модели нежесткого ротатора и учитывает взаимодействие между колебательным и вращательным движениями молекулы, так что вращательные постоянные St., Dv ... зависят от уровня колебательного возбуждения ***V: B^=Be—ae(v+V's)+*** ..., + ... здесь индекс е относится к равновесному межъядерному расстоянию двухатомной молекулы.

С учетом проведенного выше разбиения энергии молекулы можно записать волновое число для перехода между выделенными состояниями п' и п" в виде: ***V=E„„ —E„=m',+C'+P'—{T"e+ G" -b F").*** Соответственно наблюдают спектры нескольких типов: а) вращательные спектры, отвечающие переходам между вращательными уровнями в пределах неизменного колебательного и электроиного состояния; б) колебательно-вращательные спектры, возникающие при переходах между вращательными уровнями разных колебательных состояний при неизменном электронном состоянии; в) электронные спектры, характеризующие переходы между колебательно-вращательными уровнями разных электронных состояний. Помимо того, в радиочастотной и микроволновой областях спектра наблюдают переходы между подуровнями тоикой структуры для данного электронно-колебательно-вращательного уровня молекулы, а также спектры электронно-спинового и ядерно-магнитного резонаисов, соответствующих переходам между зеемановскими компоиентами расщепленных в магнитном поле уровней молекулы.

Таблица 32.5. Спектроскопические постоянные основных состояний двухатомных молекул

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное ыежъядерное расстояние г 10-" м	Частота гармонических колебаний о> СМ>	Постоянная энгармонизма	Вращательная постоянная B^, см-'	Постоянная колебательного вращательного взаимодействия о 10-» см-'	Приведенная масса для доминантно- состава , а. е. м.	Энергия диссоциации 0°, W crsi-'
к.	X 12+	2,7	192,4	0,64	0,496	0,19	53,948	1,34
AgBr	X 12+	2,393	247,7	0,68	0,0634	0,228	46,424	2,5
AgCl	X 12+	2,281	343,5	1,17	0,123	0,6	26,350	2,60
AgF	X 12+	1,983	513,45	2,59	0,266	1,92	16,132	2,9
AgH	X 12+	1,618	1760	34,1	6,449	201	0,9984	1,84
Ag	X 12+	2,545	206,5	0,44	0,0449	0,15	58,025	2,1

Продолжение табл. 32.1

Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние г.. 10-» м	Частота гармонических колебаний	Постоянная ангармонизм ш * , см->	Вращательная СМ!	Постоянная колебательно-вращательного взаимодейст-	Приведенная масса для доминантного
	2,003	490,2	3.1	0,3020	2,5	13.913
	2,47	350.0	**2.02**	0,2054	1,2	13,491
X1-S.*	2,295	378.2	1,33	0,1592	**0,86**	20,107
	2,130	481.3	1,95	0,2439	1,61	15,230
	1,6544	802.3	4,8	0,552	5,0	11,148
X IS""	1,648	1683	29,1	6,3907		0,9715
	2,537	316.1	1,0	0,1177		22,251
	1,618	979.2	6,97	0,6414	5,8	10,042
		617,1	3,33	0,2799	**1,8**	14,633
		467,6	**2,08**			20,171
	3,76	25,7*	**2,6**		3,7	19,981
	2,103	429.6	1,12		0,333	37,461
	1,736	685.8	3,1		2.4	15,155
	1.523	2180	50		212	0,9944
X IS""	**1,618**	1068,5	5,41		3,37	11,798
x^n 1/2	1,624	967,1	4,85		3,30	13,181
л: IS*	**2,00**	604,0	**2,0**		**0,8**	21.914
X. "П$_{1/2}$	2,017	567.9	1,97		**0,8**	22,409
	2,472	190,9	0,420		0,072	98,483
	2,338	333.0	1,16		0,67	23,731
А: as*	**2,060**	607.7	3,5		4,0	8,6179
XIX*	1.524	2305.0	43,1		214	1,0027
	2,443	307,9	**1,1**		0,7	21,381
X3S-		1051,3	9,4		14	5,5047
X1-Г		684,3	3,52		3.5	9,6615
XIS^		839,1	5,11		6,46	8,3732
X IS""		1402.1	II,8			6,9702
	,232	2367	49.4		412	0,9233
xis*	,14*	575	3,0			10,1305
		1515	12,3			6,1635
X^{m}"S""		1885,3	11,7		16,5	6,5209
		1180.2	6,31		**6,0**	8,1894
А: "Г	2,8445	193.8	0,41		0,122	50,194
	2,683	279.9	**0,80**		0,334	27,895
	2,159	469.4	1,83		1,16	16,698
X ^x*	2,2317	1168,3	14.5		**66**	1,0005
	3,085	152.1	0,27		**0,066**	**66,088**
	1,9397	669,8	2,03			14,333
XIS"" **л: IS***	2,507	379,4	0,884		0,32	25,955
	2,45	223,4*			**20**	4,5061

Продолжение табл. 32.1

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние $r^{\wedge}$. 10-" м	Частота гармонических колебаний см-«	Постоянная ангармонизма	вращательная постоянная $B^{\wedge}$. см-	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия а, 10-» СМ»	Приведенная масса для доминантного изотопного состава ($i^{\wedge}$,	Энергия диссоциации £<0, 10' СМ»
BeBr		1,953*	715	3,8	0,546*	—	8,0885	3,3
BeCl	Л-22+	1,797	846,7	4,8	0,7285	6,9	7,1655	3,6
BeF	X2S+	1,361	1267	9,1 -	1,489	17,6	6,1126	5,05
BeH		1,345	2071,9	48,1	10,274	207	0,9065	1,64
BeI		2,179*	611,7	1,6	0,422*	—	8,4146	—
BeO	X1S+	1,331	1487,3	11,83	1,651	19,0	5,7643	3,7
BeS	***XЧ+***	1,742	997,9	6,14	0,7906	6,64	7,0305	3,1
Bi,		2,661	173,06	0,376	0,0228	0,053	104,49	1,6
BiBr	***XO+***	2,6095	209,5	0,5	0,0432	0,133	57,285	2,21
BiCl	***XO+***	2,5	308	1,0	0,09	—	29,956	2,5
BiF	***x,o+***	2,051	513	2,3	0,230	1,5	17,415	2,7
BiH	***X*** (0+)	1,80	1635,7*	32	2,59	54	1,9949	2,0
BiI	XO+	2,800	163,9	0,28	0,0272	0,070	78,957	1,57
BiO		1,93	692	4,3	0,303	2	14,858	2,8
BiS		2,319	408,7	1,5	0,1128*	0,49	27,730	2,6
Br,		2,281	325,32	1,077	0,0821	0,318	39,459	1,589
BiCl	Z1I+	2,136	444,28	1,84	0,1525	0,77	24,232	1,61
BrF	***XIX+***	1,759	670,75	4,05	0,3558	2,61	15,312	2,055
BrO		1,717	779	6,8	0,4296	3,64	13,299	1,93
Q	X1S+	1,2425	1854,7	13,34	1,820	17,6	6,0000	5,01
OCl		1,645	876,74	5,33	0,6971	6,7	8,9341	3,3
CF		1,272	1308,1	11,1	1,417	18,4	7,3546	4,57
CH		1,120	2858,5	63,0	14,46	534	0,9297	2,79
CN		1,172	2068,6	13,1	1,8997	17,37	6,4622	6,26
CO	***X*** 1S+	1,1283	2169,81	13,29	1,93128	17,50	6,8562	8,946
CP		1,562	1239,7	6,86	0,7986	5,97	8,6491	4,3
OS	***X11+***	1,535	1285,16	6,50	0,8200	5,92	8,7252	5,93
CSe	***X*** 12+	1,676	1035,4	4,9	0,575	3,8	10,433	4,8
Ca,	***X***	4,278	64,93	1,€65	0,04612	0,70	19,981	0,106
CaBr		2,594	285	0,9	0,0945	0,404	26,529	2,6
CaCl		2,4368	370,20	1,373	0,1522	0,799	18,650	3,47
CaF		1,967	581*	2,74	0,338	2,6	12,877	4,4
CaH		2,002	1298,3	19,1	4,277	97	0,9830	1,4
CaI		2,829	238,6	0,628	0,0693	0,263	30,392	2,2
CaO	X1S+	1,822	732,1	4,8	0,444	3,4	11,423	3,8
CaS		2,318	462,2	1,78	0,17667	0.84	17,762	2,8
CdH		1,781*	1337,1	–	5,323*	—	0,9990	0,55
Ck	***X*** 12+	1,988	559,7	2,67	0,2440	1,5	17,484	1,9997
ClF	X12+	1,6283	786,15	6,16	0,5165	4,36	12,310	2,111
ClO		1,570	854	5,5	0,6234	6	10,975	2,218

Продолжение табл. 32.1

Терм основного	Равновесное межъядерное расстояние $r^{\wedge}$, 10-" м	Частота гармонических колебаний см-.	Постоянная ангармонизма см->	Вращательная постоянная $B^{\wedge}$, СМ»	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия a 10-8 см->	Приведенная доминантного состава V_A •	дитео'циации D_1 тем"
	1,679	452,3*	9	0,230	4	25,970	1,26
X	1,656	1581*	30	6,22	180	0,9886	2,3
	1,61	898	6,7	0,53	5	12,229	3,2
	4,648	42,02	0,082	0,0127	0,026	66,453	0,3628
	3,072	149,7	0,37	0,036	0,12	49,516	3,36
	2,906	214,2	0,73	0,072	0,34	27,685	3,69
XiS'^	2,345	352,6	1,61	0,1844	1,18	16,622	4,15
XIS^	2,494	891	12,9	2,710	58	1,0002	1,436
X	3,31S	119,2	0,254	0,0236	0,068	64,918	2,87
xis;	2,220	264,5*	1,02	0,1087	0,61	31,465	1,64
X12+	2,173	315	0,96	0,1019	0,45	35,011	1,9
X IS"^	2,051	415,3	1,58	0,176	1,00	22,728	3,17
xis-^	1,745	621,55	3,49	0,3794	4,23	14,593	3,6
xis^	1,463	1941,3	37,5	7,944	256	0,9919	2,3
XIS""	2,338	264	0,6	0,0733	0,284	42,069	2,4
X	1,724	640,2	4,4	0,4445	4,6	12,753	2,3
	2,054-	414	1,7	0,1884*	1,1	21,201	2,3
	1,412	916,6	11,24	0,8902	13,85	9,4992	1,292
XIS""	2,352	263,0	0,81	0,0818	0,32	37,221	3,5
XIS""	2,202	365,3	1,2	0,1499	0,794	23,199	3,97
XIS^	1,774	622,2	3,2	0,3595	2,86	14,893	4,8
	1,66	1604,5	28,8	6,137	181	0,9933	2,3
	2,575	216,6	0,5	0,0569	0,19	44,666	2,8
	2,44	274	—	0,078	—	36,454	2,3
	1,745	665,7	3,15	0,3658	2,67	15,114	4,0
*xm^*	1,588	1833,8*	40	6,726	192	0,9939	2,6
	1,625	986,49	4,47	0,4857	3,08	13,150	5,5
	2,012	576	1,8	0,1866	0,749	22,319	4,58
	2,135	409	1,4	0,0963	0,289	38,401	4,0
XIS""	2,340	324	0,7	0,0653	0,172	47,113	3,4
	0,7414	4401,21	121,34	60,85	3062	0,5039	3,6118
xx.;	0,7414	3813,1	91,6	45,65	1990	0,6717	3,6406
	0,7414	3597,0	81,68	40,60	1664	0,7554	3,6512
xxs;	0,7415	3115,5	61,8	30,44	1079	1,0071	3,6748
xxs;	0,7414	2845,5	51,4	25,40	822	1,2076	3,6881
XiSg	0,7414	2546,5	41,2	20,33	589	1,5080	3,7028
X IS""	1,4144	2649,0	45,22	8,4649	233	0,9954	3,03
xis^	1,2746	2990,95	52,82	10,593	307,2	0,9796	3,576
X IS""	0,9168	4138,3	89,9	20,96	798	0,9571	4,73

Продолжение табл. 32.1

Молекула	oJoBHoro состояния	Равновесное межъядерное рассояние $r^{\wedge}$, 10-1° „	Частота гармонических колебаний m CM-l	Постоянная ангармонизма	Вращательная постоянная см-	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия	Приведенная доминантного изотопного состава цд.	Энергия диссоциации 10* см-«
HI		1,6092	2309,01	39,64	6,4264*	169	0,9999	2,463
HtO	***X*** IS	1,723	974,1	3,23	0,3865	1,72	14,689	6,6
H&		2,92	44	0,5	0,02	—	100,48	0,089
Hgi	X	2,395	292,6	1,63	0,098	0,5	29,808	0,863
HgH	X^S	1,766*	1203,2*	120	5,389*	—	1,0028	0,3020
HoF	X	1,940	615,3	2,60	0,2630	Ь4	17,036	4,5
k		2,666	214,52	0,609	0,0374	0,114	63.452	1,2333
IBr		2,469	268,6	0,814	0,0568	0,197	48,659	1,466
Kl	XiX""	2,321	384,32	1,51	0,1142	0,53	27,415	1,7366
IF	XIS""	1,910	610,2	3,12	0,2797	1,87	16,525	2,32
IO		1,868	681,5	4,3	0,3403	2,70	14,205	1,8
InBr	XiE^	2,543	221	0,65	0,0549	0,19	47,480	3,2
InCl	XiE""	2,401	317	1,0	0,1091	0,518	26,810	3,6
InF		1,985	535,3	2,6	0,2623	1,88	16,303	4,2
InH	X IE""	1,838	1476,0	25,6	4,994	143	0,9991	2,0
Inl	X iS'^	2,754	177,08	0,343	0,03687	0,104	60,303	2,8
K,		3,925	92,405	0,328	0,0562	0,212	19,482	0,415
KBr	X1E+	2,821	213	0,8	0,0812	0,40	26,085	3,2
KCl	XiS^	2,667	281	1,3	0,1286	0,790	18,429	3,5
KF		2,171	428	2,4	0,280	2,34	12,771	4,1
KH	***XiJI****	2,240	986,65	15,84	3,419	94	0,9824	1,429
KI	***XiX****	3,048	186,5	0,574	0,0609	0,268	29,811	2,7
Kr,	***X'^l***	4,0	24,2	1,3	0,025	1,0	41,956	0,0127
LaF	***xч****	2,026*	570*	—	0,2456*	—	16,713	5,0
LaO	***x'^z****	1,826	812,7*	2,2	0,353	1,4	14,343	6,6
LaS	***X***	2,355*	456,7	0,96	0,1169*	0,3	25,990	4,8
Ih		2,673	351,43	2,595	0,6726	7,04	3,5080	0,8342
LiBr	X	2,170	563,2	3,5	0,5554	5,64	6,4432	3,5
LiCl	X IS""	2,021	643,3	4,50	0,7065	8,01	5,8436	3,9
LiF	X12+	1,564	910,3	7,9	1,345	20,3	5,1238	4,77
LiH	X is""	1,596	1405,6	23,2	7,513	213	0,8812	1,9589
Lil	X1S-(O^)	2,392	496,84	2,84	0,4432	4,10	6,6484	2,86
LiNa	XIS	2,81	257	1,6	0,396	3,6	5,3755	0,69
LiO	X	1,7	850	12	1,20	15	4,8768	2,8
LuF	XIS	1,917	611,8	2,5	0,2676	16	17,137	4,8
LuH	X1E	1,912	1500	20	4,602	100	1,0021	—
LuO		1,790	842	3,1	0,3588	1,6	14,655	5,8
		3,889	51,12	1,64	0,0929	3,78	11,993	0,0404
MgBr		2,36*	374	1,3	0,164*	—	18,395	2,7
MgCa	XIS""	4,04	60	2	0,069	2	14,989	0,0662

Продолжение табл. 32.1

Молекула	Терм основного	Равновесное межъядерное расстояние $r^{\wedge}$, 10-»» м	Частота гармонических колебаний см-'	Постоянная ангармонизма	Вращательная постоянная см-.	Постоянная колебательно-вращательного взаимодейст- 10-« см-^	Приведенная масса для доминантного изотопного состава (L^ .	Энергия диссоциации Ю'см-.
MgCl		2,199	462,1*	2,1	0,2450	1,6	14,227	2,7
MgF		1,750	721,6	4,9	0,5192	4,7	10,601	3,8
MgH		1,730	1495,2	31,9	5,826	186	0,9672	1,1
MgO		1,7484	784,8	5,3	0,5747	5,32	9,5958	3,0
MgS		2,142	528,7	2,70	0,2680	1,8	13,704	1,9
MnH		1,731	1548	29	5,684	157	0,9897	1,9
MnO	*X Ч*	1,77	840	4,8	0,43	—	12,388	3,0
MnS		2,066	491,1	1,86	0,1954	0,96	20,210	2,3
N^		1,0977	2358,6	14,32	1,998	17,3	7,0015	7,871
NBr		1,79	692	4,72	0,44	4	11,893	2,3
NCI		1,6108	827,96	5,30	0,6498	6,41	9,9990	3,2
NF	x s r	1,317	1141,4	9,0	1,206	14,9	8,0613	2,8
NH	x s s "	1,0372	3281	78,3	16,667	647,6	0,94016	2,64
NO		1,1508	1904,20	14,07	1,6720*	17	7,4664	5,240
NS		1,494	1219	7,3	0,7696*	6,3	9,7380	4,0
NSe		1,652 V	956,8	5,6	0,518	4	11,915	3,1
Na,		3,079	159,12	0,725	0,1547	0,874	11,495	0,5943
NaBr		2,502	302	1,5	0,1513	0,941	17,803	3,0
NaCl	X	2,361	366	2,1	0,2181	1,625	13,871	3,4
NaF	X	1,926	536	3,4	0,4369	4,559	10,402	4,3
NaH		1,889	1176	21,2	4,89	131	0,9655 „	1,57
Nal	X IS""	2,711	258	1,1	0,1178	0,648	19,464	2,4
NaK	X IS""	3,59	124,13	0,511	0,0905	0,46	14,459	0,520
NbO		1,691	990	3,8	0,432	2	13,646	6,3
Ne,	X iSg	3,1*	14*	–	0,17*	60	9,9962	1,6- 10-3
NiH		1,48	1927*	40	7,70*	230	0,9906	2,5
o.		1,208	1580,2	12,0	1,446	15,9	7,99746	4,126
OH	. Ч Т)	0,970	3737,8	84,9	18,91	0,724	0,9481	3,54
P2		1,893	780,8	2,83	0,3036	1,5	15,487	4,06
PBr		2,171	458,3	1,6	0,1607	0,69	22,244	3,6
PCI	x^i:	2,0146	551,38	2,23	0,2529	1,51	16,4251	–
PF		1,590	846,7	4,49	0,567	4,6	11,776	3,7
PH		1,422	2365	45	8,537	250	0,9761	2,8
PN		1,491	1337,0	6,9	0,7865	5,54	9,6434	5,1
PO		1,476	1233,3	6,6	0,734	5	10,548	4,92
PS	X ' П ,	1,901*	739	3,0	0,2963*	–	15,733	3,7
Pba		2,93	110,1	0,32	0,0189	0,051	103,99	0,66
PbCl		2,18*	304	0,9	0,119*	—	29,936	2,5

Продолжение табл. 32.1

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние	Частота гармонических колебаний	Постоянная ангармонизма	Вращательная постоянная *Bg.* СМ»	Постоянная колебательно-вращательного взаимодейст-вия а 10-3	Приведенная масса для доминантного изотопного состава .	Энергия диссоциации № см-
PbF		2,057	507,3	2,3	0,2287	1,47	17,408	2,9
РЬН		1.839	1564	29,8	4,971	144	1,0030	1,3
PbO	XIS""	1,922	721	3,5	0,3073	1,91	14,853	3,1
PbS		2,287	429,4	1,3	0,1163	0,44	27,712	2,83
PbSe	XIS""	2,402	278	0,5	0,0506	0,13	57,732	2,5
РЬТе		2,595	212,0	0,4	0,0313	0,07	79,961	2,1
PdD		1,529	1446,0	19,6	3,649	81	1,9772	–
PtC	x i s	1,677	1051,1	4,9	0,5304	3,3	11,304	5,1
PIII		1,529	2390	50	7,196	200	1,0026	2,77
PtO	X12	1,727	851,1	5,0	0,3822	2,8	14,782	3,1
щ		4,210	57,78	0,139	0,0224	0,055	42,456	0,393
RbBr		2,945	169,5	0,46	0,0475	0,186	40,903	3,1
RbCl		2,787	230	0,9	0,0876	0,454	24,769	3,5
RbF	***X***	2,270	375	2	0,2107	1,52	15,525	4,0
RbH		2,367	937,2	14,17	3,020	73	0,9960	1,5
Rbl	***X***	3,177	138,5	0,33	0,0328	0,109	50,873	2,7
RhC	***x^x***	1,613	1049,9	4,94	0,603	4,0	10,747	4,85
S2	X32-	1,8894	725,6	2,84	0,2954	[,59	15,986	3,524
SF		1,596	837,6	4,47	0,5552	4,46	11,917	2,7
SH	***xmt***	1,341	2712	60	9,461*	270	0,9770	2,9
SO	***x^чг***	1,481	1149,2	5,6	0,7208	5,74	10,661	4,322
Sb2		2,35	270,0	0,59	0,0501	—	60,948	2,5
SbF	***Xi*** (o"")	1,918	610,2	2,6	0,279	2	16,418	3,6
SbO	x ^ n .	1,826	820	4	0,358	2	14,126	3,2
SbP		2,21	500,1	1,63	0,141	0,5	24,657	2,97
ScCl	***Xil****	2,23	447	2	0,173	1	19,669	2,7
ScF	***X*** IS"^	1,788	736	4	0,395	2,7	13,355	5,0
ScO		1,668*	973,3	4,2	0,5134*	3	11,797	5,6
Se^		2,166	385,37	0,98	0,0899	0,29	39,958	2,751
SeH		1,47*	2400	-	7,8*	–	0,9953	2.6
SeO		1,648	914,7	4,5	0,465	3,2	13,327	3,56
SeS		2,037	555,6	1,85	0,1793	0,8	22,670	3,0
su		2,25	511,0	2,0	0,239	1,3	13,988	2,6
SiBr	***X***	2,26*	424	1	0,160*	–	20,655	3,1
SiCI	***xm.***	2,06	535,6	2,17	0,256	1,6	15,542	3,8
SiF	***xm^***	1,601	857,2	4,73	0,5812	4,9	11,315	4,5
SiH	***x 2П,***	1,520	2042,52	36,06	7,5039	218	0,9728	2,47
Si1		2,4	364	1,2	0,12*	—	22,923	2,4
SiN		1,572	1151,4	6,5	0,731	5,6	9,3321	4,2
SiO	***X***	1,510	1241,56	6,0	0,7268	5,04	10,177	6,66

Продолжение табл. 32.1

Молекула	Терм состояния	Равновесное межъядерное расстояние r_e, 10-1» „	Частота гармонических колебаний см-'	Постоянная ангармонизма " Л - СМ-»	Вращательная постоянная B,. СМ-.	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия α 10-» см->	Приведенная масса для доминантного изотопного состава [i^ ,	Энергия диссоциации D_0, 1СсМ-
SiS	*X* IS""	1,929	749,5	2,57	0,3035	1,44	14,921	5,2
SiSe		2,058	580	1,8	0,1920	0,78	20,722	4,5
Sn^	*X % (Op*	2,75	189,7	0,5	0,0385	0,1	59,447	1,68
SnCl		2,36	351	1.1	0,112	0,4	27,073	3,5
SnF		1,94	583	2,7	0,273	1,4	16,362	4,0
SnO		1,833	822	3,7	0,3557	2,14	14,112	4,41
SnS		2,209	487,3	1,36	0,1369	0,506	25,241	3,8
SnSe		2,326	331	0,74	0,0650	0,17	47,954	3,4
SnTe	*X* IS""	2,523	259	0,5	0,0425	0,10	62,352	3,0
Sr,		4,5	83	—	0,019	—	43,953	0,10
SrBr		2,735	216,6	0,52	0,05418	0,183	41,585	2,75
SrCl		2,576	302,6	0,97	0,10156	0,452	25,017	3,4
SrF	*X*	2,075	502	2,3	0,2505	1,55	15,622	4,5
SrH		2,146	1207,04	17,11	3,6735	80,2	0,9964	1,3
Sri	*x^x^*	2,974	173,8	0,35	0,0367	0,106	51,932	2,3
SrO		1,920	653,5	4,0	0,3380	2,2	13,533	3,9
SrS	*X »£ •*	2,440	388,4	1,3	0,1207	0,44	23,445	2,8
TaO		1,687	1028,7	3,5	0,4028	1,8	14,696	6,6
Te,		2,558	247,07	0,522	0,03967	0,099	64,953	2,159
TeO	*XiO^*	1,825	797,1	4,0	0,355	2,4	14,241	3,1
TeS		2,230	471,2	1,6	0,1322	0,5	25,657	2,8
TeSe		2,37	316,2	0,74	0,062	0,2	48,420	2,4
ThO	X12	1,840	895,8	2,4	0,3326	1,3	14,963	7,2
TiO		1,620	1009,0	4,50	0,5354	3,0	11,994	5,5
TiS		2,083	558,4*	1,9	0,2018	0,9	19,182	3,8
TlBr	X1S'"	2,618	192,1	0,4	0,0424	0,13	58,014	2,76
TlCl	X'S^O")	2,485	284,7	0,88	0,0914	0,40	29,873	3,08
TIF		2,084	477	2	0,22315	1,50	17,387	3,69
TiH	X IS""	1,87	1391	23	4,81	0,15	1,0029	1,6
Til	*X*	2,814	143*	—	0,0272	0,07	78,379	2,32
VO		1,589	1011	4,9	0,5482	3,5	12,173	5,2
Xe,		4,36	21,1	0,6	0,014	—	65,194	0,0186
XeCl		3,2	26	-0,3	0,060	—	27,641	0,024
YCl	xis""	2,41	381	1	0,116	0,3	25,097	2,8
YF	X	1,926	636,3	2,5	0,2904	1,6	15,653	5,0
YO		1,788	861,46	2,87	0,3889	1,72	13,556	5,9
YbF	X	2,016	501,9*	2,2	0,2414*	1	17,128	4,0
YbH	X	2,053	1249,5	21,1	3,993	96	1,0020	1,5
ZnH		1,595	1608	55	6,679	250	0,9922	0,69
ZrO	X IS'^	***1,712***	969,8*	4,9	0,4226*	2	13,579	6,3

в табл. 32.5 собраны данные о спектроскопических постоянных основных состояний двухатомных молекул с указанием в отдельной графе символа электронного состояния, параметров колебательно-вращательного состояния **(l)e, *BleXe, Be* И Oc,** значений приведенной массы молекулы iiyi=Mi^f2/(Mi+Af2) для доминантного изотопного состава элементов, а также энергии диссоциации Dq, отвечающей разрыву связи молекулы в основном колебательном состоянии.*. Кроме того, на рис^ 32.44—32.48 представлена более детальная информация о ходе электронных термов для небольшого числа хорошо исследованных двухатомных систем — Hs, CO, N2, N0 и O2.

При отборе материала для табл. 32.5 мы использовали таблицы спектроскопических постоянных двухатомных молекул [3, 141 и многочисленные журнальные публикации последнего времени. Погрешности в определении числовых значений величин были учтены при округлении значащих цифр в пределах ±1 для последней приведенной цифры. Оцениваемые погрешности определения электронных термов двухатомных молекул и ионов указаны непосредственно на рис. 32.44—32.48.

• Звездочкой в табл. 32.5 в графах для r^, и^ и начены, соответственно, значения Гс , ДО,/г и Bo.

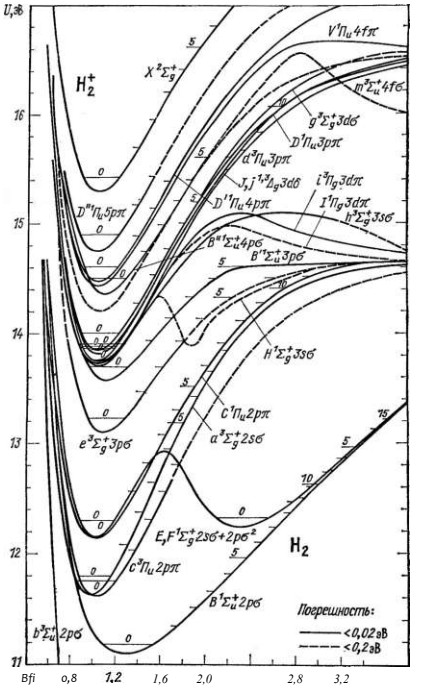


Рис. 32.44. Электронные термы молекул Нг и H2+ 115]

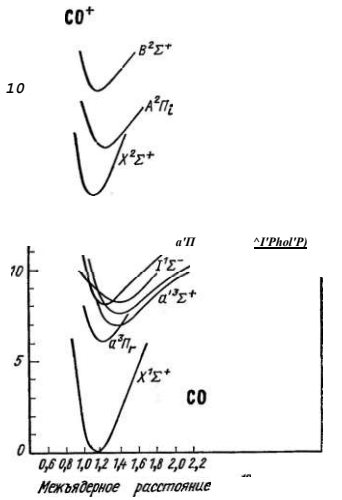


Рис. 32.45. Электронные термы молекул CO и CO+ [3, 16]

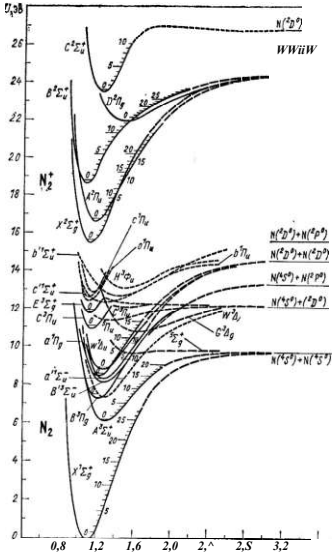


Рис. 32.46. Электронные термы молекул Nj и N2+ [17]

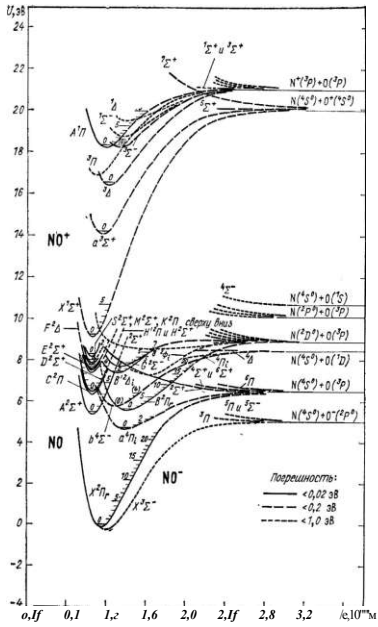


Рис.^32,47. Электронные термы молекул N0, N0+ и N0-

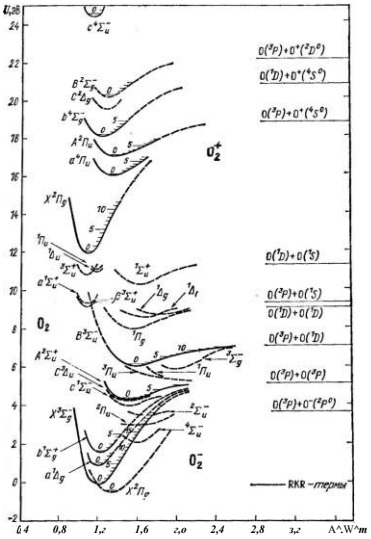


Рис. 32.48. Электронные термы молекул Or, O2+ и O,- [19]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопьев В. Е., Яцеико А. С. Диаграммы Гротриана нейтральных атомов (группы I—III, лантаноиды, актиноиды). Препринт Института автоматики и электрометрии СО АН СССР № 160. Новосибирск. 1981; Уровни энергий и радиационные переходы нейтральных атомов (группы IV—VIII). Препринт Института автоматики и электрометрии СО АН СССР № 161. Новосибирск. 1981.

2. Bashkin S., Stoner J. O. Atomic Energy Levels and Grotrian Diagrams. Amsterdam: North-Holland. Vol. 1 (H I—P XV)—1975; Vol. 2. (S I—Ti XXII)—1978; Vol. 3 (V I—Cr XXIV)—1981; Vol. 4 (Mnl—MnXXV)—1982.

3. Radzig A. A., Smirnov B. M. Reference Data on Atoms, Molecules and Ions. Heidelberg: Springer, 1985.

4. Meggers W. F., Corliss C. H.. Scribner B. F. Tables of Spectral—Line Intensities. — 2nd ed./NBS Monograph 145 Washington: US Government Print. Office. 1975. Part I.

5. Стригаиов А. Р., Одинцова Г. А. Таблицы спектральных линий атомов и ионов. М.: Энергоиздат, 1982.

6. Коидои Е., Шортли Г. Теория атомных спектров: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.

7. Freeman A. J., Frankel R. H. Hyperfine Interactions. — N. Y.: Aeademic Press, 1967.

8. Fuller G. H.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1976. Vol. 5. P. 835-1092.

9. Arimondo E., Inguscio M., Violino P.//Rev Mod. Phys. 1977. Vol. 49. P. 31—75.

10. King W. H. Isotope Shifts in Atomic Spectra. N. Y., London: Plenum, 1984.

11. Heilig K. Bibliography on experimental optical isotope shifts, 1918 through October 1976//Spectrochim. Acta. 1977. Vol. B32. P. 1—57; Bibliography on experimental optical isotope shifts, November 1976 to October 1981//Spectrochim. Acta. 1982. Vol. B37. P. 417—455.

12. Bauche J., Champeau R. J.//Adv. Atom. Mol. Phys. 1976. Vol. 12 P. 39

13. Стригаиов А. Р., Донцов Ю. П.//Успехи физ. наук. 1955. Т. 55 С. 315; Головин А. Ф., Стригаиов А. Р.//Успехи физ. наук. 1967. Т. 93. С. 111.

14. Хьюбер К. П., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул: Пер. с англ./Под ред. Н. Н. Соболева. М.: Мир, 1984.

15. Sharp T. E.//Atomic Data. 1971. Vol. 2. P 119.

16. Krupenie P. H. The band spectrum of carbon monoxide//**NSRDS-NBS** Washington: **NBS.** Vol. 5. 1966.

17. Lofthus A., Krupenie P. H.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1977. Vol. 6. P. 113—307.

18. Gilmore F. R.//J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1965. Vol. 5. P. 369.

19. Krupenie P. H.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1972. Vol. 1. P. 423—534.

Глава 33

ЭЛЕКТРО-, МАГНИТО-, ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

М. Е. Бродов. В. П. Яновский

33.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Под действием электромагнитного излучения в материальной среде возникает дипольный момент, атомы среды поляризуются. При малых напряженностях электрического поля излучения ***E*** индуцированная поляризация (или электрический дипольный момент единицы объема вещества) связана с ***E*** линейной зависимостью

где — линеиная оптическая восприимчивость вещества. Линейная поляризация обусловливает существование таких известных оптических явлений, как отражение и преломление света. Линейная восприимчивость связана с показателем преломления соотношением

(1)

Для больших напряженностей светового поля, таких, которые развиваются в пучках мощных лазеров, наведенная поляризация может быть представлена в виде ряда по степеням напряжеииости ***E*** [1]

где х'®'. Х'®' и т. д. — нелинейные восприимчивости вещества, связанные с разнообразными нелинейными оптическими эффектами.

В общем случае в разложении поляризации по степеням поля необходимо учитывать также низкочастотные гюля. Большинство нелинейных эффектов связано с членами ряда, пропорциональными квадрату и кубу амплитуды электрического поля Квадратичная поляризация обусловливает существование таких эффектов, как генерация второй гармоники, оптическое выпрямленне, линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) и параметрическая генерация. К эффектам, обязанным своим существованием поляризации, кубичной по полю, относятся генерация третьей гармоники, квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра), двухфотонное поглощение, вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна и вынужденное релеевское рассеиние.

33.2. ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА)

Линейным электрооптическим эффектом (эффектом Поккельса) называют изменение показателя преломлеяия вещества, пропорциональное приложенному электрическому полю.

Связь между изменениями поляризационных констант вещества ДВ,7=А(1/е),7 (где е — диэлектрическая проницаемость) и приложенным электрическим полем е., В/м, дается электрооптическими коэффициентами, Uik, м/В:

$$= \quad Eh\text{-:}$$

где I, /, 2, 3. Коэффициенты образуют поляр, ный тензор третьего ранга, называемый тензором линейного электрооптического эффекта.

В сокращенной записи

$$ABi = г\ Ik\ Ek,$$

I= (ij) и в зависимости от ***ij*** индекс ***I*** пробегает значения от 1 до 6: 1 = (11), 2=(22), 3=(33), 4=(23К 5=(13), 6=(12).

Ниже приведены тензоры электрооптических коэффициентов по сингониям в зависимости от типа точечной симметрии кристаллов (в скобках указано число независимых коэффициентов, отличных от нуля).

Триклинная ***I*** — Ci;

«ии	'-12	***Гг3***
'-2]	'-22	***Г23***
Гзг	'•32	***Гзз***
		Чз
ГЪ1	Г52	***Гьз***
"'6!	Гь2	

(18) элементов

Моноклинная:

2-Cг ***m*** - C s

0	***Г12***	0	211X2	***Гц***	0	'•13	
0	***Г22***	0			0	'•23	
0	***гзг***	0		***Гзх***	0	'•33	
41	0	***Чз***		0	'•42	0	
0	'•82	0		'•51	0	***гьз***	
'•el	0	'•вз	(8)	0	'•62	0	**(10)**

Орторомбическая:

222-•D,

о	о	о		о	о	'-13
о	о	о		о	о	"23
о	о	о		о	о	'•33
'•41	о	о		о	"42	о
о	***гьг***	о		***гы***	о	о
о	о	"63	**(3)**	о	о	о

(5)

Тетрагональная:

4-Ci

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & \text{'•хз} \\ 0 & 0 & \text{'-13} \\ 0 & 0 & \text{"33} \\ \text{"ц} & & 0 \\ \text{гьг} & \text{-'•41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (4)$$

*4-S^*

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & \text{а з} \\ 0 & 0 & \text{-/-13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \text{rtx} & \text{—гы} & 0 \\ \text{'•б!} & \text{'-41} & 0 \\ 0 & 0 & \text{Гбз} \end{vmatrix} \quad (4)$$

422-1 04

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ 0 & \text{—'"41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (1)$$

4mm — Civ

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & \text{л,з} \\ 0 & 0 & \text{/-13} \\ 0 & 0 & \text{лзз} \\ 0 & \text{Г51} & 0 \\ \text{Гы} & 0 & 0 \\ \text{О} & \text{О} & \text{О} \end{vmatrix} \quad (3)$$

42 m —

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ f\,u & 0 & 0 \\ 0 & & 0 \\ 0 & 0 & \text{'-63} \end{vmatrix} \quad (2|1\text{Xi}) \quad \textbf{(2)}$$

Тригоиальная:

3 - Сз

$$\begin{vmatrix} \text{Гц} & \text{—Г22} & \text{^з} \\ \text{~ f n} & \text{Г22} & \text{Пэ} \\ \textbf{0} & \textbf{0} & \text{Гзз} \\ \text{Гц} & \text{fsi} & \textbf{0} \\ \text{Гьг} & \text{—Гц} & \textbf{0} \\ \textbf{-'-22} & \textbf{"""и} & \textbf{0} \end{vmatrix} \quad \textbf{(6)}$$

32-Ds

$$\begin{vmatrix} \text{Ги} & \textbf{0} & \textbf{0} \\ \text{—Ги} & \textbf{0} & \textbf{0} \\ \textbf{0} & \textbf{0} & \textbf{0} \\ \text{Гц} & \textbf{0} & \textbf{0} \\ \textbf{0} & \text{-Гц} & \textbf{0} \\ \textbf{0} & \textbf{—Гц} & \textbf{0} \end{vmatrix} \quad (2)$$

3m-Cзг,

$$\begin{vmatrix} \textbf{0} & \textbf{-Г22} \\ \textbf{0} & \textbf{Г22} \\ \textbf{0} & \textbf{0} \\ \textbf{0} & \textbf{Гы} \\ \textbf{Гы} & \textbf{0} \\ \textbf{—Г22} & \textbf{0} \end{vmatrix} \quad (4)$$

Гексагональная:

6 - С ,

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & \textbf{Гхз} \\ 0 & 0 & \text{"13} \\ 0 & 0 & \text{'-33} \\ \text{"41} & \textbf{ГВ!} & 0 \\ \textbf{Гц} & \text{—'41} & 0 \\ \textbf{0} & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (4)$$

6~Сзн

$$\begin{vmatrix} \text{'•и} & \text{—'"22} & 0 \\ \textbf{—Гц} & \textbf{Г22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \text{—'"22} & \textbf{—Гц} & 0 \end{vmatrix} \quad \textbf{(2)}$$

Є22-D,

$$\begin{vmatrix} O & O \\ O & \\ O & \\ O & \\ & \\ O & \end{vmatrix} \quad (1)$$

бmm - С е г -

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & \text{г^з} \\ 0 & 0 & \text{гм,} \\ 0 & 0 & \text{гзз} \\ 0 & \text{Гы} & 0 \\ \text{Гы} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (3)$$

6m2 — Озк

$$\begin{vmatrix} 0 & \text{—'-22} & 0 \\ 0 & \text{'-22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \text{—Г2Я} & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \textbf{(m±Xi)} \quad \textbf{(l)}$$

Кубическая:

432- -0

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad 0 \quad 1$$

23 и Щm- •Т nТй

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \\ \text{Гц} & 0 & 0 & \\ 0 & \text{Гц} & 0 & \\ 0 & 0 & \text{Гц} & \end{vmatrix} \quad \textbf{(1)}$$

Линейный электрооптический эффект существует лишь в кристаллах, не имеющих центра инверсии. Центр инверсии отсутствует у 21 точечной группы, для которых электрооптический тензор имеет отличающиеся от нуля составляющие.

Значения электрооптических коэффициентов для различных типов кристаллов приведены в табл. 33.1—33.4. Если частота электрического поля, при которой произведены измерения, намного выше или ниже частоты собственного акустического резонанса, то использованы соответственно обозначения *(S) иг.^^или (Т)* и *г-^i^.* Погрешность измеренных значений щц около 15%. В сегиетоэлектриках и других материалах, имеющих фазовый переход, наблюдается сильная зависимость электрооптического коэффициента от температуры, если последняя близка к критической температуре Ткр. Зависимость гцк от длины волны света в области прозрачности веществ, как правило, слабая.

Одной из важных характеристик электрооптических кристаллов является полуволновое напряжение 1/^/2 ' т. е. напряжение, соответствующее набегу разности фаз, равной п, между двумя световыми во.пиамн с взаимно перпендикулярными поляризациями. Эта величина может быть найдена из соотношения

$$\text{«3'"33-п?'-13} \qquad \text{"з'}$$

где гс=гзз—Г1з(пУп1), м/В; Я, — длина во.пиы, м; U полуволиовое напряжение. В, в чйстном случае одноосных кристаллов [ось z (или ось 3) — оптическая] и при распространении света в перпендикулярном оси *z* на-

Таблица 33.1. Электрооптические свойства кристаллов типа KDP и ADP
Симметрия 42/п фи температуре выше критической T^p [2]

		r_{ij}, 10-" м/В	I-4,. 10-" М/В		
KH2PO4 (KDP)	123	(Г) 9,37 (S) 8,15 Лбз<0	+8,6 '"41 < 0	(Г) 21 *(S) 21*	42 44
KD2PO4 (DKDP)	222	(Г) 26,4 (S) 24,0 0,93г^ч	8,8 –	(Г) 50 (S)48	— 58
KH2ASO4 (KDA)	97	*(Т)* 10,9 –	12,5 —	(Г) 21 *(S)* 19	54 53
KD2ASO4 (DKDA)	162	*(Т)* 18,2	—		—
RbH2P04 (RDP)	147	*(Т)* 15,5 (S) 0,91 *г1*	— –	— –	— —
RbHsAsO^ (RDA)	ПО	(Г) 13,0	—	(Г) 27	41
RbD2As04 (DRDA)	178	*(Т)* 21,4	—	(5)24	39
CSH2ASO4 (CDA)	143	*(Т)* 18,6	–	–	
CSD2ASO4 (DCDA)		(Г) 36,6	–	–	
NH4H2PO4 (ADP)	148*1	*(Т)* - 8 , 5 (S) 4,1	23,1 '-41 < 0	*(Т)* 15 (S) 14	56 58
ND4D2PO4 (DADP)	242*1	*(Т)* 11,9	—		–
NH4H2ASO4 (ADA)		*(Т) 9,2*	–	–	

•i Антиферроэлектрический переход.

Таблица 33.2. Электрооптические свойства кристаллов типа **АВОз** [2]

Вещество (К)	Симмет-рия		*t* «/в	X, мкм	
LiNTOg (1470)	*3m*	(Л'•33 = + 3 2 , 2 **(рл1з = + 10**	(Т) Л22=6,8 (7)Г51=32	0,633 0,633	**(Г) ei = E2 = 78** **(Л ^3=32** (S) Ei=E2 = 43
		1? **(Г)гс=16** (5)гзз = + 30,8 (S) /•,з=+8,6 (S) /-33 = 28	1 /-22 = 5,7 **ш** 1 /-22 = 3,1 (S) Л22 = 3,4 (5)Г51=+28 (5)гг2 = 3,1 *(S)* /-51=23	1,15 3,39 0,633 0,633 3,39 3,39	(S) Ез = 28
ЫТаОз (890)	***am***	(5)гзз=30,3 *(S)* гхз = 7 (5)Г33 = 27 (S /-13 = 4,5	rsi = 20 **Si** гг2~1 *(S* Г51=15 *(S)* /-22—0,3	0,633 0,633 0,633 3,39 3,39	**(Г) £2=^1 = 51** **S .** **(S) . , - 4 3**
BaTiOs (395)	4mm	(Т)гс=108 (S)/-c = 23 19 (S) Лгз = 28 (S)/-i3 = 8	(Т)/-51= 1640 (S) Л51 = 820 — — —	0,546 0,546 0,633 0,633 0,633	(S) £1=^2 = 2300 (S) е з = 6 0
KsLi^NbsOw (693)	4mm	*(Т)* гi3 = 8,9		0,633 0,633	**(Т) 81=^7=309** **(Г) Ез = 100**
Sro.75Bao,25Nb20e (-330)	4mm	(Г)гс= 1410 ***(Т)*** /-33 = 1340 *(Т)* Л13-67 (S) 1090	1142 — — —	0,633 0,633 0,633 0,633	**Ез = 3400 (15 МГц)** — —
Sro.5Bao,5Nb.Oe	4mm	(Г) Гс = 218 (15 МГц) Гс = 96	—	0,633 0,633	е з = 450 (15 МГц)
Sro.25Bao.75Nb.O,(~520)	4mm	(15 МГц) Гс = 45	—	0,633	£3 = 118 (15 МГц)
PbTiOj (765)	*Amm* *4mm*	*(Т) Гс* = 450 (5)Г33 = 5,9 (S) г^ = 13,8	(Л Г5, = + 50 —	0,633 0,633 0,633	— (S) £3 = 31

Вещество (Г^р, К)	Симмет-рия	Г,з, 10-" м/В	'•ih, 10-" "/в	Х. мкм	
KSr^NbAs (433)	*4mm* или *4*	(Г)/-,= 130		0,633	(Г)е з=1000
LilOg (пироэлектр.)	*6*	**ill 5=1:5:1**	(S)/-41= 1,4 (S) /-и=+3,3	0,633 0,633	(Т) 1200
BajNaNbsOis (833)	*mm2*	(Г) /-23 = 13 (5)ЛЗЗ = 4-29 *(S)* /-,3=8 (S) ЛЗ = 7	0Г4. = 92 (Г) /-51=90 (S)/-42=75 (S) /-51=88	0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633	**и** Г)Е, = 235 Г) е, = 247 S) = 227 (S) е з=32

Таблица 33.3. Электрооптические свойства кристаллов типа АВ [2]

вещество	Симмет-рия	"ih, "/В	Х, МКМ	
CuCl	*43m*	(Л /-41 =3,6 (Г)/-41 =3,2 (S)/-41 = + 2,35 (S) /-41 = + 2,20	0,633 10,6 0,633 3,39	(S) е = 7,5 – — —
CuBr	*43m*	(Г) /-41=0,85	0,525	—
ZnO	*6mm*	*(S)* /-33 = + 2,6 (S) /-13=-1,4 (S) /-33=+ 1,9 (S)'-13=+0,96	0,633 0,633 **3,39** **3,39**	(S) Ei=E2 = 8,15 SW E3 — —
ZnS	*Шm*	(Г)/-41= 1,2 (Г)/-41= 2,1 (S) /-41 = 1,6 (S) /-41= 1,4	0,4 0,65 0,633 3,39	*(Т)* Е = 16 (Г, S) е = 8,3 —
CdS	*6mm*	**(Л /-51=3,7** **(Г) /-^=5,5** **(S) лзз=2,4** **(S)/-13= 1,1**	0,589 0,589 10,6 0,633 0,633	(Т) El=9,35 (S) 4 = 9,02 (5)е з=9,53
CdSe	*6mm*	(S)/-33 = 4,3 (S) /-13 = 1,8	3,39 3,39	***(Т)*** **Е3= 10,65** **(Г) 4=9,70** **(S) El = 9,33** **(S) Е3= 10,20**
CdTe	*43m*	(Г) /-41=6,8 Ф 4^=6,8 *(Т) Л41* = 5,5 (Г)г« = 5,0	3,39 10,6 23,35 27,95	*(S)* Е = 9,4 — — —
HgS	*32*	(S)/-11= 3,1 (S)/-41 =1,4 (S)/-11 = 4,2 (S)/-41 =2,4	0,633 0,633 3,39 3,39	— — —
ZnS	*6mm*	(S) /-33= 1,8 (5)лзз=1,7 (S)/-13 = 0,9	0,633 3,39 0,633	(S) 4 = 8,7
ZnSe	*43m*	*(Т)* /-41 = 2,0 (S)/-41 = 2,0	0,546 0,633 10,6	(Г)е = 9,1 (S) е = 9,1

продолжение табл. 33.3

Вещество	Симмет-рия			
ZnTe	*43m*	Т)Г41= 4,45-3,95 Г) Г41= 1,4 *S)* Г4l = 4,3 (5)Г41=3,2	0,59; 0,69 10,6 0,633 3,39	(Т) 10,1 (S)e=10,1
GaP		(5)Г41=-1,07-(-0.97)	0,56; 3,39	(S) e = 12 (S) e = 10
GaAs	*43m*	(S)r4j=1,2 (S)/-41=-1,5 (5 + Г)/-41= 1,2- 1,6 *(Г)* /-41= 1,0-1,2 (Т) Ди1 = 1,6 (S)/-41= 1,5	0,9 1,08 3,39 1,0; 3,0 4,0; 12,0 10,6 10,6	(S) E = 13,2 (S) E = 12,3 (Г) E = 12,5

Таблица 33.4. Электрооптические свойства кристаллов различных типов [2]

Вещество	Симмет-рия		ХМКМ	*n.* (Х. мкм)
Bi4 (Oe04)з	*43m*	(Т) 1,03	0,45-0,62	«0 = 2,07
(CH2)6N4 (НМТ - гексамети-лентетрамин)	*43m*	(Л/-41 = 0.710,8 (Г) /-41=0,78 (S) /4l<0,14	0,546 0,633 0,633	По= 1,591 (0,589) «0 = 1,594 (0,633) —
Гайиит (минерал)	***Т3т***	(Г) /-41<0,04	0,633	По = 1,496
K2Mg,(S04)3	*23*	(Г) /-41=0,40	0,546	По= 1,535 (0,589)
	23	(Г) '-41=0,70	0,546	«0= 1,606 (0,589)
(ЫН4)2МП2(504)3	*23*	(Г) /-41=0,53	0,546	«0= 1,57 (0,589)
Tl,Cd2 (S04)3	*23*	(Т) Г4l = 0,37	0,546	По = 1,730 (0,589)
К2МП2 (S04)3	*23*	(Г) /-41=2,0	0,453—0,642	1,62 (0,45 - 0,65)
RbsMng (804)3	*23*	(Г)/-41= 1,9	0,453—0,642	1,60 (0,45-0,65)
Т12МП2(504)3	*23*	(Г) /-41 = 2,1	0,453-0,642	1,80 (0,45-0,65)
KsNi^ (804)3	*23*	(Г) /-41= 1,0	0,453-0,642	1,70 (0,45-0,65)
ЫаСlОз	*23*	**(Л'-41= 0,4**	0,589	«0= 1,515
Ыаз8Ь84 • ЭНгО	*23*	**(Г) /г3/-4, = 5,66** **(ЛП?'-41 = 5,62**	0,42 1,08	—
Уранилацетат натрия	*23* *6*	*(Т)* /-41=0,87 (Г)/-,= 1,6	0,546 0,546	«0= 1,507 (0,546) Пз»П1 = П2= 1,474 (0,546)
LiNa804	3/п	(Г)/-22 <0,02	0,546	/ «3 = 1,495 \ «1 = Пг = 1,490
Турмалин	*3m*	(Г| ^22 = 0,3 (S '-33='-13= 1.7 (Г| /-,, = 0,92	0,589 0,633 0,50	«3 = 1,65 П1 = П2 = 1,63 П1 = П^= 1,643 (0,50)
Na3Li (Cr04)2 • 6H2O	*3m*	**(Г)/-22 = 0,82** **(Л /-22 = 0,77**	0,52 0,60	ni = /t2= 1,635 (0,52) «i = ft2= 1,612 (0,60)
AgsAsSs (прустит)*!	*3m*	(5)(/г|/-13-«|гзз)=70 (S)«^22 = 29	0,633 0,633	«1 = 3,02 (0,633) «3 = 2,74 (0,633)
	32	(Г)/-11 = 0,26	0,546	*1* «3=1,1518 \ «1= «2= 1,456
CS,C4H40,	*32*	(Г) /-11 = 1,0	0,546	1 «3= 1,546 \ Ml = «2 = 1,564
Sr820e . 4H2O	*32*	(Л'-11 = 0,1	0,546	(«3= 1,528 \ П1 = «2 = 1,532
Se*2	*32*	(S) = 89 (S) Гц-2,5	1,15 10,6	< «1=^2,737 (1,15) \ «3=3,573 / «1 = 2,64 (10,6) \ «3=3,41

продолжение табл. 33.3

Вещество	Симмет-рия	*"ih,* "/в	мкм	*n.* (Л, мкм)
SiOs (кварц)*з	*32*	0 , ' -11 = — 0,47 (Г)/ –11 = 0,20 (S) - 0,23 (S),""ll = 0,29 (S)/ 0,174	0,409-0,605 0,633 0,633 0,633 0,633	«3 = 1,555 (0,546) «1 = «2 = 1,546 (0,546) –
(CeHisOebNaBr-H^O	*32*	0,1	0,546	«3 = 1,560 (0,546)
AgGaS*"	*42m*	Ф , '63 = 3,0 (Г),"41 = 4,0	0,633 0,633	«1 = «2 = 2,55 (0,633) «3 = 2,50
Gd2(Mo04)3*5	*42m*	*(Г) г* = 17 (450 К)	0,633	«1 = «2 = 1,528 П2 = 1,848 (0,633)
CdCasSa	*mm2* *4*	-«|'-з з = 17,5(300 К) (Г), 0,37 *r't* =	0,633 0,50 0,50	«3 = 1,901 (0,633) } «1 = «2 = 2,3 (0,50)
(NH4)2C204 • HrO	*222*	Ф'-4 1 = 230 *(Г) ГВ2* = 330 *(Т) r,s* = 250 *(Т) /-* «2 5 0 2	0,633 0,633 0,633 0,633 0,633	*'Н* — 1,437 (0,65) «2 = 1,547 «3 = 1,590 – –
NaNOa*»	*mm2*	**(е г -** = 4,1	0,546	«1 = 1,347 (0,546)
		(Г),32 — =14,2	0,546	«2 = 1,415
		(t r - = 0,6	0,546	«3 = 1,661
		(Т), ля = - 1 , 9 ***(X)*** '-61 =- 3 , 0	0,546 0,546	—
C(CH,OH)4	*2*	*(Т)* ГS2 = 1,45 (Г)1 '-12-^ 3 2 1 = 0 ,7 *nf*	0,46—0,70 0,46-0,70	«1 = 1,528 «3 = 1,56
a , N b A	*2*	(Г) '-22- = 12	0,63	**ftl =** 1,97
		(Т) '-22 • «3 = 14	0,63	«2 = 2,16
		(S) «1 = 13	0,63	«3 = 2,17
		(S)r 12 —6,7 (S)A-5l2 = 25,5 (5)Г32 = 6,4 (5)Г41 = 2,7 (S)/-52< 0,6 63 = 0,9	0,63 0,63 0,63 0,63 0,63 0,63	

г,1 < о и г . , > о в левовращающем кварце!
• M S) ' 8 = 1 4 , (5) e , = 10.
« Г^ = 432 К, = 8.

•• приняло полярной осью, переход i при 432 К: (S) e, = 5. 6^ = 4. £, = 8.

33.3. МАГНИТНОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ (ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ)

Поворот плоскости поляризации света, распространяющегося в среде, находящейся во внешнем магнитном поле, называют линейным магнитооптическим эффектом или эффектом Фарадея. В пара- и диамагнитных материалах угол поворота плоскости поляризации мин, дается соотношением

$$= VHl\ COSY, \qquad (33.1)$$

где V — постоинная Верде, ... мин — ', зависящая (А /м) м А от природы вещества, частоты света и температуры; Я— напряженность приложенного магнитного поля, А/м; / — длина пути луча в веществе, м; у — угол между на-«фавлеиием приложенного поля и направлением распространения луча, град.

В ферромагнитных материалах напряженность магиитного поля в выражении для <рг заменяется намагниченностью М, Тл, а постоянная Верде — постоянной Кундта К, град/(Тл-см), В таблицах обычно приводят характерное для ферромагнетиков значение параметра вращения при насыщенной намагниченности ***Ms,*** Тл, определяемое как удельное фарадеевское вращение плоскости поляризации Ms для света, распространяющегося вдоль вектора намагниченности ***Ms,*** т. е.

$$F = K M s, \qquad (33.2)$$

где F — удельное фарадеевское вращение, град/см.

При рассмотрении магнитооптических характеристик веществ необходимо учитывать ослабление излучения при распространеиии его во вращающей плоскость поляризации среде. Для характеристики «качесгва» различных магнитоактивных сред служит величина *2F/a,* где а — коэффициент ослабления или поглощения в законе /=/о exp (—а/).

К соотношениям (33.1) и (33.2) применимо обычное правило правой руки. Так, положительные <рг и F соответствуют случаю, когда свет распространяется вдоль направления магнитного поля и плоскость поляризации вращается по часовой стрелке.

В табл. 33.5—33.7 — приняты следующие обозначения:

Тс — температура Кюри;
Тр — температура фазового перехода:
Тп — температура Нееля;
Тсо — темлература компенсации;
Ms, Тл — индукция насыщения при О К;
F, град/см — удельное фарадеевское вращение;
а, см-> — коэффициент поглощения;
2F/a, град — характеристики качества;
Х, им — длина волны излучения;
ОЦК — объемиоцентрированный куб;
ГПУ — гексагональная плотная упаковка;
ГЦК — гранецентрированный куб.

Таблица 33.5. Характеристики ферромагнитных, ферримагнитных и антифероомагнитных веществ (1]

	Структура или состав	Критическая температура. К	*Mg* , Тл	*F,* град/См	*а,* см-'	2F/a, град	*Т.* К	Х, км
Металлы переходной группы:								
Fe	ОЦК	Гкр=1043	0,1735	3,5-108	7,6-108	0,92	300	546
				5,1-105	3,2-108	3,1	300	1000
				4,4.108	6,5-108	1,4	300	500
				6,5-108	5-108	2,6	300	1000
				7-108	4,2-108	3,3	300	1500
				7-106	3,5-108	4,0	300	2000
	ГПУ	7'„р=1390	0,145	3,6-108	8.5-108	0,85	300	546
				2,9-108	–	–	300	500
				5,5-108	6,1-108	1,8	300	1000
				5,5-108	4,5-108	2,4	300	1500
				4,8-108	3,6-108	2,7	300	2000
	ГЦК	Г«р=633	0,051	0,99-108	8,0-108	0,25	300	546
				7,2-108	4,2-108	3,4	300	4000
				0,8-108		–	300	500
				2,6-106	5,8-108	0,9	300	1000
				1,5-108	4,8-108	0,6	300	1500
				1-108	4,1-108	0,25	300	2000
				0,79-108	–	–	300	546
(монокристалл)				0,88-108			300	546
				0,97-108	–	–	300	546
Бинарные компаунды и сплавы:								
пермаллой	ГЦК (Ni:Fe,%, 82:18)	Гкр=803	0,085	1,2-108	6-108	0,4	300	500
CrTe	NiAs	Г„р=334	0,0081	0,5-108	2,0-108	0,5	300	550
				0,4-108	1,2-108	0,7	300	900
				0,4-108	0,6-108	1,3	300	2500
MnAs	NiAs	Г„р=313		0,44-108	5,0-108	0,174	300	500
				0,49-108	4,9-108	0,200	300	600
				0,59-108	4,6-108	0,26	300	700
				0,78-108	4,5-108	0,34	300	800
				0,62-108	4,4-108	0,28	300	900

Продолжение табл. 34.2 ***Продолжение табл. 34.2***

	Структура	Критическая температура. К	$M^{\wedge}$, Тл	*F,* град/см	а, СМ-«	*2F/a.* град	Г, к	Х. НМ
	NiAs (низкотемпе-**ратурная фаза)**	Г„р = 639	0,061 (0,060 при 300 К)	4,2-108 5,0-108 7,0-106 7,7-108 7,6-108 7,5-108 7,4.10®	6,1-108 5,8.108 5,1-108 4,5-108 4,3-108 4,2-108 4,1-108	1,4 1,7 2,8 3,4 3,5 3,6 3,6	300 300 300 300 300 300 300	450 500 600 700 800 900 1000
	Высокотемпе-**ратурная фаза**	**Гкр = 453**	(0,044 при 300 К)	3,2-108 3,3-108 3,3-108 3,3-108 3,3-10» 3,2-108 3,2-108	6,1-108 5,8-108 5,1-108 4,7-108 4,5-10^ 4,4-108 4,4-108	1,0 1,1 1,3 1,4 1,4 1,4 1,4	300 300 300 300 300 300 300	450 500 600 700 800 900 1000
FeRh		Г^, = 333		0,9-108	3,3-108	0,56	348	700
Ni+Fe	100:0		0,048	1,2-108	7,05-108	0,34	300	632,8
	90:10		0,067	1,6-108	7,14-108	0,45	300	632,8
	80:20		0,086	2,2-108	7,10-108	0,62	300	632,8
	70:30		0,103	2,7-108	7,0-108	0,77.	300	632,8
	60:40		0,119	2,9-108	7,54-108	0,77	300	632,8
	50:50		0,127	2,8-108	8,13-108		300	632,8
	40:60		0,115	2,2-108	8,17-108	O!54	300	632,8
	30:70		0,064		8,13-106		300	632,8
	20:80		0,154	3,3-108	8,1-108	0,81	300	632,8
	10:90		0,166	3,6-108	8,13-108	0,88	300	632,8
	0:100		0,172	3,5-108	8,13-108	0,86	300	632,8
	35:65		0,099	2,1-108	7,7-108	0,55	300	400-700
Ферриты:								
Lio.5Fe2.5O4				-440	150	6	300	1500
				-190	135	3	300	2000
				-flO	85	0,2	300	3000
				-f85	60	3	300	4000
				-fl1O	44	5	300	5000
				-fl25	44	6	300	6000
				-fl35	80	3	300	7000
MgPeA	—	—		-60	100	1	300	2500
				-40	40	2	300	3000
				0	12	0	300	4000
				-1-30	4	15	300	5000
				-f35	6	11	300	6000
				+50	13	8	300	7000
CoFe204	Шпинель	Г; y=793	0,0392	2,75-10^	12-10*	0,5	300	286
				3,8-10^	14.10*	0,5	300	330
				3,6-104	17-10*	0,4	300	400
				1,3-10*	13-10*	0,2	300	500
				-2,5-10*	6.10*	0,8	300	660
NiFeOi	Шпинель		0,0267	2,0-10*	5,9-10*	0,7	300	286
				2,4-10*	7,4-10*	0,7	300	330
				-0,75-10*	16-10*	0,09	300	400
				-1,0-10*	108	0,2	300	500
				-fO,12-10*	10*	0,2	300	660
				—120	38	6	300	1500
				+40	32	2,5	300	2000
				+75	15	10	300	3000
				+110	15	15	300	4000
				+ 110	32	7	300	5000

Продолжение табл. 34.2 **Продолжение табл. 34.2**

Вещество	Структура или состав	критическая температура. К	$M^{\wedge}$, Тл	*F*, град/см	а, СМ>	2F/a. град	*T*. к	
Y1G	Гранат		0,020	240	0,069	7-10»	300	1200
				2400	1500	3.2	300	555
				1750	1350	2,6	300	588
				1250	1400	1,8	300	
				800	1150	1,4	300	667
				900	670	2,7	300	715
				750	450	3.3	300	770
				175	<0,06	>3-103	300	1500
BaFeisOis	Гексагональная	-	—	-50	38	3	300	2000
				+75	20	7,5	300	3000
				-f130	13	20	300	4000
BaFei20i9	Гексагональная			-f150	20	15	300	5000
				-f160	20	16	300	6000
				-f165	22	15	300	7000
Ba^Zn^FeisOis	Гексагональная			-f90	120	1,5	300	5000
				-f80	70	2	300	6000
				+75	65	2	300	7000
				+70	85	2	300	8000
GdIG	Гранат	7^ = 564	0,058	-2000	6000	0,6	300	500
		Гсо==286		—1050	900	2,3	300	600
				-450	400	2,3	300	700
				—300	100	6	300	800
				—220	230	1,9	300	900
Фториды:				—80	70	2,3	300	1000
	Перовских	Гд,= 109	–	180	9	40	77	600
RbFePg*	Перовскит	Гр=102		3400	7	900	82	300
				1600	3	1100	82	400
				950	4,6	410	82	500
				620	1,5	830	82	600
				420	1,2	700	82	700
				300	2,5	240	82	800
RbNiF3*3	Перовскит		0,0099	360	35	20	77	450
				210	12	35	77	500
				70	10	14	77	600
				—70	30	5	77	700
				310	70	9	77	800
				100	60	3	77	900
				75	25	6	77	1000
Тригалиды:								
CrCis	Bilg	= 16,8	0,031	2000	200	20	1,5	410
				-500	300	3	1,5	450
				—1000	70	30	1,5	590
CrBrз	Bils	Г = 32,5	0,0270	3-108	3-108	200		478
				1,6.108	1,4;10*	23	1,5	500
Crlg	Bils	Г,, = 68	0,0214	1,M0B	6,3-108	35	1,5	970
				0,8.108	3-108	53	1,5	1000
Халькогениды:								
EuO	; NaCl	*Tc* = 69	0,189	-1,0-108	0,5-10«	40	5	1100
				3,2-108	7,5-10^	t8,5	5	800
				5-105	9,7-10^	10	5	700
				3,6-108	9.7.W	7,5	6	600
				0,5.108	7.8. W	1,3	5	500
				3-W	>0,5	-108	20	2500
				660	>1,0	--1300	20	10 600

продолжение табл. ***34.2 Продолжение табл. 34.2***

Вещество	Структура	Критическая температура,ЛГ	*M*^ Тл	***F,*** град/см	а, см-'	2f/a, град	Г, *к*	***К*** нм
EuS	NaCl	Tc =16,3		— 1,6.106	~ o		6	825
				-9,6-108	3,3-10=*	58	6	690
				5,5-10^	1,2-106	92	6	563
				5,1-106	1,0-10»	10	6	495
EuSe	NaCl	***Tc*** =7	0,105	1,45-106	80	3600	4,2	750
				1,17-106	70	3340	4,2	775
				0,95-106	60	3170	4,2	800

Продолжение табл. 33.5

Вещество	**Mg , 10-» Тл**	F, град/см, для длин волн. нм						**a, см-', для Л = 1250 нм**
		6.0	800	1000	1200	1400	1600	
Ортоферриты*^:								
DvFeOs*^'	1,02	4300	1700	1100	670	480	370	-40
YFeOs*9^	0,84	3000	1200	670	520	370	260	~10

' Направление световой волны соответственно вдоль (100], (110] I [111].
' Имеется сильное естественное двулучепреломление.
® Измерено вдоль оси *с*.
^ Все ортоферриты обладают сильным естественным двулучепреломлением .
' Оптические оси лежат в плоскости (100) и с осью *с* составляют угол, изменяющийся до 46° при длины волны от о 1600 нм.

Таблица 33.6. Характеристики парамагнитных веществ [2]

Кристалл						
Ионы редких земель в кристаллах:						
CaF,	Eu^	3	430		11,5	3,1
			440	**28**	1,8	15
CaF,		2,9	426,4	0,24	5	0,048
			450	5,7	20	0,28
EuFa	Eu^		500	3,3	7	0,47
			550	?:S	6	0,34
			600	**1,0**	5,5	0,25
			650		5	0,2
Перовскиты (оксиды):						
SrTiOs	298		413	0,98		
			496	0,39		
			620	0,18		
			826	0,083		
			427	1,2		
			496	0,48		
			620	0,23		
			826	0,09		
			352	0,55	327	370
			413	0,24		
			496	0,12		
			620	0,064		
			826	0,028		

продолжение табл. ***34.2 Продолжение табл. 34.2***

Вещество	*Т*. *к*	*V*, МИН/А, для Х, нм							
		405	450	480	520	546	578	635	670
Редкоземельные гранаты:									
TbAlG*!	300	—2,797	—1,967	—1,621	-1,306	-1,146	-0,989	—0,779	—0,681
	77	-	-	-	-4,304	-3,834	—3,271	—2,523	—2,281
	4,2	-	—128	—104,9	—81,43	-73.32	—67,57	-60,81	—35,93
	1,45	-	-252,5	—216,8	-175,0	—157,2	—139,8	—122,5	-117,4
DyAlG	300	-1,559	—1,18	—1,01	—0,838	-0,744	—0,651	-0,516	-0,451
HoAlG	300	—0,891	—0,402	—0,327	-0,421	—0,382	-0,376	-	-0,259
ErAlG	300	-0,237	-0,302	—0,193	—0,204	-0,197	—0,182	—0,132	—0,112
TmAlG	300	+0,19	+0,129	+0,117	+0,095	+0,087	+0,074	+0,0603	-
YbAlG	298	0,361	0,27	0,234	0,176	0,167	0,146	0,П8	-
	77	0,902	0,678	0,604	0,494	0,43	0,379	0,30	-

при Г=300 К.

Таблица 33.7. Магнитооптические свойства стекол [2]

Массовое содержание S %				V, мин/А. при Г = 300 К для Х. им									
Еиг+	EuO	А 1Л		406	435	450	500	550	600	650	700	750	800
Европиевое стекло													
12,9	14,4	15,3	70,2	-0,795	-0,428	-0,354	—0,204	-0,131	-0,095	-0,077	-0,062	-0,053	-0,040
14,7	16,5	11,2	72,0	-0,940	-0,503	—0,411	—0,25	-0,165	—0,113	—0,088	-0,069	-0,058	-0,048
17,9	20,0	13,4	66,2	—1,48	—0,848	—0,66	—0,374	—0,261	—0,187	-0,142	—0,114	—0,05	-0,075
26,7	29,9	11,0	60,0		-1,60	—1,23	—0,657	—0,461	—0,324	-0,24	—0,198	—0,162	-0,138
30,5	34,2	14,8	50,7			—3,2	—1,58	—0,906	—0,601	-0,46	—0,337	-0,283	-0,219

Боратное стекло с ионами редкоземельных элементов

Состав"		V. МИН/А, при *Т* = **300 к для им**									
R		**405**	**436**	**480**	**500**	**520**	**546**	**578**	**600**	**635**	**670**
La	3,04	0,054	0,045	0,036	0,033	0,029	0,028	0,024	0,023	0,020	0,018
Pr-- La	5,44	—0,477	-0,386	-0,290	-0,276	—0,253	-0,224	-0,192	—0,183	-0,161	—0,138
Nd - La	5,41	-0,226	-0,185	—0,151	-0,139	—0,121	-0,118	-0,126	—0,074	—0,070	-0,058
Sm - La	4,97	0,040	0,038	0,031	0,030	0,028	0,024	0,021	0,020	0,018	0,013
Eu - La	4 69	—0,101	-0,075	-0,048	-0,041	—0,036	—0,030	-0,024	—0,020	—0,018	—0,015
Gd - La	4^71	0,040	0,033	0,030	0,028	0,026	0,025	0,023	0,021	0,019	0,016
Tb-- La	4,73	-0,643	-0,526	-0,401	—0,362	-0,329	-0,291	-0,258	-0,234	—0,210	-0,178
Dy.- La	4,88	-0,548	-0,454	—0,376	—0,343	-0,309	-0,276	-0,242	-0,222	—0,200	—0,173
Ho.- La	4,36	-0,338	-0,317	-0,155	-0,165	—0,141	—0,161	—0,131	—0,121		—0,093
Er-- La	4,50	-0,117	-0,098	-0,085	-0,103		—0,057	—0,053	—0,050	—0,044	—0,043
Tm — La	4,75	0,075	0,058	0,049	0,043	0,039	0,038	0,029	0,026	0,023	0,020
Yb - La	8,58	0,144	0,118	0,092	0,083	0,075	0,068	0,058	0,054	0,046	0,041
Tb-- Pr	4,99	—1,18	-0,987	—0,704	—0,673	—0,614	-0,548	-0,477	-0,437	—0,384	-0,3^53
Dy - Pr	4,63	—1,07			—0,624	—0,584	—0,519	—0,450	-0,417	—0,364	-0,317
Pr	2,56	-1,06	-0,812	—0,592	—0,603	—0,543	—0,490	—0,420	-0,398	—0,340	—0,305

Продолжение табл. 33.7

Алюмосиликатное стекло

Состав (мгюсовое содержавие. %)	*V.* мин/А, для *X,* нм										*т.* к
	365	404	54Ь	650	700	800 1 900		1100 1 -		1300	
КГеОц (58) SiOs (25) АЬОз (12) MgO (4) Sb^Og (1)	-1,31 -4,30	—0,955 -3,15	-0,440 —1,46	—0,299 —0,980	-0,249 -0,823	—0,185 0.613	—0,141 —0.466	—0,084 -0,291	—0,064 —0,230	-0,044 -0,173	295 77,4

Праэеодимовое

Оу^Оз (g) SiO (25) Й о ' (4) \ о з (1)	·1,11 -4,20	-0,849 —3,24	-0,422 —1,61	—0,290 —0,109	—0,237 -0,910						295 77,4

Диспроаиевое

Тербиевог

(25fAU03(12) **(4) SbjOg (1)**	—1,4 -5,45	-1,08 -4,02	—0,490 -1,78	-0,332 -0,123	-0,276 —1,01	—0,200 —0,744	-0,151 —0,565	—0,093 —0,353	-0,074 —0,283	-0,059 -0,229	295 77,4

Продолягснис табл. 33.7

V. мин/А, при **г** = 300 **к** для X,

R	*X*	405	436 1 480		500	520	546	578	600	635	670
Фосфатное с ионами редкоземельных элементов (R)*i											
La	–	0,046	0,038	0,030	0,028	0,025	0,023	0,019	0,018	0,016	
Ce	2,67	—0,844	—0,641	-0,460	—0,410	-0,361	—0,318	—0,273	—0,147	-0,217	-0,188
Pr	3,09	—0,562	—0,417	-0,356	-0,388	—0,296	—0,261	—0,229	—0,214	—0,188	-0,166
Nd	2,92	—0,314	—0,263	-0,210	-0,195	—0,171	-0,168	—0,118	—0,100	—0,100	—0,089
Sm	2,87	0,033	0,030	0,025	0,025	0,021	0,019	0,018	0,015	0,014	0,013
Eu	2,93	—0,031	—0,021	—0,013	-0,008	-0,008	—0,006	—0,005	-0,004	—0,0025	-0,0025
Gd	3,01	0,023	0,019	0,018	0,015	0,015	0,014	0,014	0,013	0,011	0,011
Тъ	2,94	—0,704	-0,575	-0,448	—0,406	-0,371	-0,328	-0,284	—0,259	—0,239	-0,206
Dy	2,51	—0,678	-0,569	—0,451	-0,416	-0,378	-0,337	-0,298	—0,273	—0,247	-0,217
Ho	2,94	—0,376	-0,393	—0,196	—0,192	—0,173	-0,173	-0,149	-0,138	—0,123	—0,106
Er	3,01	-0,175	-0,152	-0,126	—0,139	—0,119	—0,078	—0,075	—0,072	—0,064	—0,055
Tm	2,79	0,024	0,016	0,015	0,011	0,010	0,008	0,006	0,005	0,005	0,009
Yb	3,01	0,109	0,090	0,070	0,063	0,057	0,051	0,045	0,040	0,036	0,030

Состав **для** La **и** Pr: RjO, • * BjOs; для **ТЬ** — Pr и Dy — Pr: R^Os R^^O, - x BjOs; для других RzO.-O.SS Ьа^О, • *x Bfi*, . i Состав р,о,• * PrO,.

Таблица 33.8. Значения постоянной Верде V для жидкостей [2]

Жидкость		*i. "С*	*У. 10'* мин/(Тл-см)
н ,0	546	20	1,54
	578	20	**1,37**
	589	20	1,307
HCl	589	20	2,24
с с ц	578	20	1,68
NHa	578	—40	1,73
PC13	578	26	3,05
№(С0)4	578	17	7,35
Bra	700	0	5,3
BrH	589	20	3,43
SiCl4	589	16	1,89
HI	589	20	5,13

Таблица 33.9. Значения постоянной Верде органических соединений [2]

Вещество	*к* нм	*t. "С*	*V,* да мин/(Тл см)
C4Hjo	578	—10	1,179
C5H12	589	20	1,1490
СбНх2	589	25	1,240
СбНб	578	20	3,10
С,Н,4	589	20	1,2946
	589	15	2,47
CluHis	589	20	1,3785
QaHjo	589	15	3,82
	589	15	3,22
	578	18	**3,53**
CHCl3	578	18	**1,67**
CCl4	578	20	1,68
CeHsCl	589	25	2,891
	589	25	3,25
	589	26	0,9515
	589	15,2	1.13
а s	589	15,2	2,44
СбН,К		15	4.14

33.4. КВАДРАТИЧНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ КЕРРА)

В кристаллах, обладающих центром симметрии, а также в изотропных веществах существует квадратичный электрооптический эффект, при котором изменение показателя преломления вещества пропорционально квадрату напряженности электрического поля.

Внешнее электрическое поле E ориентирует молекулы, обладающие электрическим моментом (дипольным, квадрупольным и т. п.), в результате возникает анизотропия и показатели преломления **п** ц (вдоль поля) и п X (перпендикулярно полю) становятся различными: ПЦ — п ± разность хода необыкновенного и обыкновенного лучей равна здесь К — постоянная Керра, м^/В^ *п* — показатель преломления в отсутствие поля, I — длина оптического пути, м; £ — напряженность электрического поля, В/м.

Эффект Керра, вызванный электрическим полем световой волны, называют высокочастотным. Значение постоянной Керра зависит от природы вещества, частоты света и температуры (табл. 33.10, 33.11).

Таблица 33.10. Значения постоянной Керра для газов при давлении p = 101,3 гПа и длине X = 546 нм [2]

K_s, 10^{-24} м⁴/В²	Газ	K_s, 10^{-24} м⁴/В²	Газ
H2 34.6	0,50	CgHs **О**	0,94
о. **О**	0,50	**с л** **О**	**1,18**
О	0,33	(СНз)20 **18**	-5, 6
22	0,16	(СаНьЮ 62,7	—4,3
Cla 24	**2,6**	**CH3Cl**	40,5
CO2 17,5	1.7	C^H^Cl	61,3
N2O 56.7	24,0	CHC13	—8,5
26	3,4	**CH2ClCH2Cl** 108.5	5,2
н а 18	6,4	(СНз)2СО 83,1	5,6
H,s 18	1.8	113.6	6,17
NH3 17,5	3,6	СвНзСНз 137.7	**10,8**
HCN 20	103	CeHsCl 153,7	41,3
SO, 18	—10,4	QHsNO, 235,5	162
CH4 **О**	0,27		
QHe **О**	0,74		

Таблица 33.11. Значения постоянной **Кер** жидкости при длине волны X = 546 нм

Жидкость	Г. к	K_s 10-» МВ/м²	Жидкость	Г. к	K_s 10-» MS/2
О,	90	1,2	орто-СбН4(СНз)2	293	6,08
N2	71,4	4,46	(С2Н5),О	293	-2,95
С8з	293	13,4	CHC13	293	12,9
CeHia	293	0,252	СбНбС1	293	45,1
СвНв	293	1,62	CeHsNOa	293	1570

33.5. ЭФФЕКТ ФОТОУПРУГОСТИ

Упругооптический эффект, или эффект фотоупругости, состоит в изменении показателя преломления вещества в результате влияния внешних статических или переменных механических напряжений.

Связь между изменением индикатрисы показателя преломления ^{\\ri^)i, и тензором деформаций Ski определяется упругооптическим тензором рцн! четвертого ранга- Так как (In^),.. и Ski симметричны и безразмерны, то элементы тензора pijki также безразмерны и в силу симметрии по парам индексов ***(ij)*** и (kl) можно использовать укороченную запись:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^{6} P_{ij} S_j, \quad i = 1, 2, \ldots, 6,$$

применяя для пар индексов ***(ij)*** и ***(kl)*** стандартнце обозначения: 1 вместо (11), 2 вместо (22), 3 вместо (33) и 4, 5. 6 соответственно вместо (23) и (32), (13) и (31),

Фотоупругие свойства различных веществ для материалов различных точечных групп симметрии (рис. 33.1) приведены в табл. 33.12.

Дифракция света на акустических волнах может быть использована для отклонения пучков оптических лучей (табл. 33.13).

В табл. 33.12 и 33,13 кроме значений рц приведены также часто используемые для вычисления свойств материалов коэффициенты акустооптического «качества» М^ сз/г, Жг, с3/1 и Жз, см.с^/Ь:

$$Ж_r = \frac{p^2}{\rho v^3},$$

где ***n*** — показатель преломления; ***p*** — компонента тензора фотоупругости; р — плотность вещества и о — скорость звука в нем.

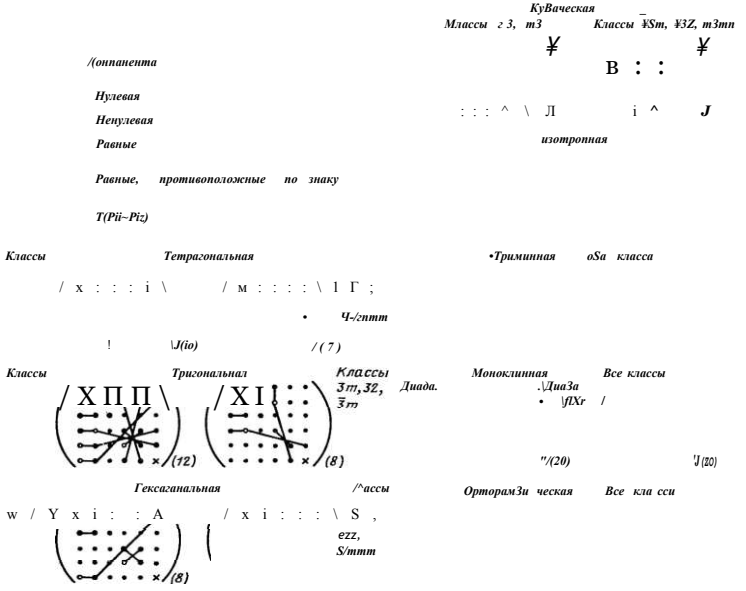


Рис. 33.1. Форма упругооптических тензоров (по сингониям) [2]

Таблица 33.12. Фотоупругие свойства веществ по сингонииям [2]

Все измерения выполнены кри Г = 300 К. Средняя погрешность для Если знак не указан, известен только модуль P_{ij}. Коэффициент

Сингония (класс)	Вещество	мки	Ри	Ри	Af,
Изотропная	Кварц плавленый	0,63	+0,121	0,270	1,0
	АЗаЗз-стекло	1,15	+0,308	0,299	230
		0,63	0,31	0,31	106
	33% Ge, 55% Se, 12% As	1,06	0,21	0,21	164
		0,63			18
	Стекла разные	0,59	0.09-0,24	0,18—0,28	
	Тяжелый флинт	0,63	0,27	0,24	12,5
	РЬО. 25Ь203	0,63			18,5
	Люцит	0,63	^30	0^8	33
	Полистирол	0,63	0,30	0,31	84

Продолжение табл. 33.12

Сингония (класс)	Вещество	X, мки	Pii	*Ри*	P44	*M,*
Кубическая	QaP	0,63	-0,151	-0,082	-0,074	29,5
(43m, 432 и m3m)	QaAs	1,15	—0,165	-0,140	-0,072	**69**
	Y3Al5Ol2 (YAQ)	0,63	-0,029	+0,009	-0,061	**0,048**
	v g g o . , v , o ,	1,15	0,025	0,073	0,041	0,22
		0,63	+0,091	-0,01	+0,075	2,3
	Ge	10,6	+0,27		+0,125	540,0
	ZnA1A	0,63	<0,009	0,03	—	0,005
	SrTiOs	0,63	0,13	0,095	0,072	1,1
	YsGasOis	0,63	0,091	0,019	0,079	0,56
	Бромид таллия	0,63		–	—	118,3
	Алмаз	0,59	_0,31.--0,43	-0,03-f-+0,i9	-0,16	—
	LiF	0,59	+0,02	+0,128	—0,064	—
	MgO	0,59	—0,32	-0,08	—	—
		0,63				33
		0,59	+0T22	+0,171	-0,026	
	KC!	0,59	+0,17	+0,124	–	—
	KI	0,59	+0,210	+0,169	–	—
	NaCl	0,59	+0,110	+0,153	-0,010	–

Сингония (класс)							*ли*
Кубическая							
(23 и *m3)*	$Ba(NO_3)_2$	0,63	0,15		0,29	**0,02**	
	$Bi_{12}GeO_{20}$	0,63					6, 0
	$Bi_{12}SiO_{20}$	0,63					17,0
	$Pb(NO_3)_2$	0,63					
	$NaBrO_3$	0,59	0,185	0,218	0,213	-0,0139	
	$NaClO_3$	0.59	**0,162**	0,24	**0,20**	-0,198	

Продолжение табл. 33.12

Сингония (класс)											
Тригональная	LiTaOg	0,63	**0,08**	**0,08**	0,09	0,03	0,09	0,15	0,02	0,02	0,91
(3m, 32 и 3m)	**. - « . o ,**	0,63	**0,20**	0,078	~0		O	0,252		0,09	**0,22**
		10,6	0,155	0,130							2,92
		0,63	**-0,02**	**+0,08**	+0,13	**-0,08**	+ 0,17	+0,07	-0,15	**+0,12**	9,0
	Рубин (A1r0з + 0,05% Cr)	0,63	-0,23	-0,03	**+0,02**	**0,00**	-0,04	**-0,20**	**+0,01**	-0,10	
	ОС-Кварц (SiOa)	0,59	**+0,128**	+0,25	+0,259	-0,029	+0,258	+0,098	-0,042	-0,0685	
	CaCOз		•J-0,095	+0,189	+0,215	**-0,006**	+0,309	-L0,178	+0,01	-0,090	
(3 и 3)	Li,W04	0,63									2,5
Гексагональная	**CdS**	0,63	0,142	**0,066**			0,041				
(6m2, 6mm,_622 и											
61mmm){6, 6 и *6/m)*	LilOs	0,63	0,32			0,03	0,41				
Тетрагональная	TiOa (рутил)	0,63	**-0,011**	+0,172	-0,168		-0,096	-0,058			**2,6**
(4mm, *42m,*	**ADP**	0,63		+0,246	+0,236		+0,195	+0,263		0,075	4,2
422 и *4/mmm)*	**KDP**	0,63		+0,249	+0,246		+0,225	**+0,221**		0,058	2,5
	ZrSi04	0,63	**0,06**		0,13		0,07	0,09		**0,10**	2.4
	TeOr	0,63	0,0074	+ 0,187	+0,340		+0,090	+0,240		-0,046	525,0
	Sro.75Ba 1,25 NbaO,	0,63	0,16	0, 10	**0,08**		0,11	0,47			**26,0**
	Sro,5 Ba, **,5 Nb A**	0,63	0,06	**0,08**	0,17		0,09	0,23			5,8
(4, 4 и 41m)	**PЬMoOa**	0,63	0,24	0,24	0,255		0,15	0,29			23,7
	CdMo04	0,63	**0, 12**	0,10	0,13		0,11	0,18			4.5
	PbW04										**21,0**

Продолжение табл. 33.12

Сингония (класс)	Вещество	мкм	***Рп***	Р12	Р13	Р31	Р22	***Ргъ***	Р.i	Ри	Рэ>	Р44	***Рьъ***	***Ри***	***м.***
Орторомбическая	а-НЮз	0,63	0,406	0,277	0,304	0,279	0,343	0,305	0,503	0,310	0,334	-	–	0,092	55,0
	Са (ЫЬОз)г	0,63													1,3
	РЬСОз	0,63	0,15	0,12	0,16	0,05	0,06	0,21	0,14	0,16	0,12	-	-	–	15,0
	Ba,NaNb50i5														5,0-4-10,0
	BaS04	0,59	+0,21	+0,25	+0,16	+0,34	+0,24	+0,19	+0,27	+0,22	+0,31	+0,002	-0,012	+0,037	
Моноклинная (все классы)	PbjMoOs	0,63													27,0

Таблица 33.13. Акустооптические свойства веществ [2]

Поляризация света определяется параллельно (11) или перпендикулярно ( ) плоскости, проходящей через направление распространения световой и акустической ВОЛН, ГТродольняя (попбрбчнпэя) поляриззция зкустичбской волны помвчвиз зизком • Коэффициенты кэчбствэ нормировзны по плавленому кварцу. Коэффициент перевода: 1,5М0-i8 cVr. Ослабление звука нарастает с частотой как *f-^*, где *x* > 1. Данные пересчитаны к *f* => =500 МГц в предположении, что д; = 2

Вещество	Область прозрачности, мкм	мкм		Направление акустической волны	ЮБ си/с	Поляризация, направление световой волны	Afi		ЛПз	Ослабление звука для *f* = 500 МГц, дБ/МКС
н,0	0,2-0,9 0,2-1,8	0,633	1,33	-	1,5	(l или J,	6,1	106	24	75
GaP	0,6-10,0	0,633	3,31	* * [100]	6,32 4,13	**Ц** **Ц** или J. [010]	75 17,4	29,5 16	69 25,7	< 1,0
Ge	2-20	10,6	**4,0**	* [111] * * U00]	5.50 3.51	Ц или J.	1270 182	540 190	1380 308	4,2 0,8
Кварц плавленый, SiO,	0,2-4,5	0,633	1,46	&	5,96 3,76	**1** **Ц** или J.	1,0 0,12	1,0 0,31	1,0 **0,2**	**'1!**
а-НЮз	0,3-1,8	0,633	1,98	* [001]	2,44	J- [010]	13,6	55,0	32	**0,6**
LiNbOs	0,5-4,5	0,633	2,20	* [1120]	6,57	–	8,3	4,6	7,5	<0,03
PbMoOi	0,4-5,5	0,633	2,39	* [001]	3,66	**Ц** или J. [100]	15,3	23,7	24,9	1,2
АззЗз-стекло	**0,6**—11	1,15	2,46	*	**2,6**	i.	78,0	230	182	11,0
СеззЗСбвЛззг-**стекло**	1-14	1,06	2,7	*	2,52	**Ц** или J.	53,0	164	128	1,8
Te	5-20	10,6	4,8	* [1121)]	2,2	11 [0001]	1320	2920	3550	-
Te02	0,35-5,0	0,633	2,27	* [001]	4,26	1 [010]	18,5	22,8	25,6	1,0
				* * [110]	0,617	**Ц или ± [001]**	8,8	525	85,0	3,0
TiO,	0,45-5,5	0,633	2,58	* [1120]	7,86	**X [0001]**	7,9	2,6	6,2	-

33.6. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Способность вещества вращать плоскость поляризации света при прохождении его через вещество называют ***естественной оптической активностью.*** Естественной оптической активностью обладает большое число кристаллов и их растворов.

Оптическую активность веществ характеризуют удельным вращением [a]f, т. е. углом поворота a плоскости поляризации света, проходящего через слой вещества толщиной 10 см при температуре ***t,*** "С, длине волны Я и концентрации оптически активного вещества, равной 1 г/см®. Для чисто активной жидкости [a]= =a/(1p), для растворов [a]= 100a/(/Pp), где a — угол поворота, град; I — толщина слоя, дм; p — плотность, г/см®; *P* — концентрация оптически активного вещества, г/100 г раствора.

Таблиц! 33.14. Оптическая активность метиловых эфиров [2]

Эфир	14». град-см7(г-дм)	град-см»/дм
HCO^QoHis	—79,52	— 146,3
	-79,42	—157,3
	-75,51	—160,2
	—69,52	-156,9
	—65,55	—157,3
	—62,07	—157,7
	-58,85	-155,7
	-55,25	-155,8
ж а & й	-53,16	—157,3

Таблипа 33.15. Оптическая активность этилтартрата в различных растворителях [2]

Растворитель	Дипольный момент растворителя p, дебай	
	0	0
	1,16	5
СбН»	0,4	7,4
СН6СНз	0	12,5
	1,25	20,2
	1,56	21,8
	1,56	23,0
	3,85	67,9
	3,90	80,6
	2,75	107,7
Чистый этилтартрат	–	16,25

Таблица 33.16, Удельное вращение кристаллов [2J

Кристалл	Формула	Класс	Длина нм '	[к], град/мм
Лития-калия сульфат •	KLiSOi	Ce	589	±3,43
Кварц	SiO,	*Ds*	434	41,924
			486 1	32,761
			589^3	21,724
			656,3	17,320
Киноварь	**Hgs**	?	687	325
Натрия хло-	NaClOg		556	±1,42
Oixap	C12H22OU		589	1,6—5,4*1
Сегнетова соль	KNaC4H406-•4H2O	*Di*	589	- 1 , 4

*! Для различных направлений.

Молекулярная вращательная способность определяется выражением [M]=[a] M/100 град-см^/дм, где M — молекулярная масса активного вещества, г

В табл. 33.14—33.16 приведены характеристики оптической активности ряда веществ^

33.7. ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В КРИСТАЛЛАХ

Генерация второй гармоники кристаллах описывается поляризацией среды

$$\cdot \quad 2$$

где коэффициенты образуют тензор третьего ранга. Перестановка компонент поля ***E"i*** и ***E%ne*** влияет на значение *Pi.* поэтому члены тензора удовлетворяют условиям симметрии силу этого, как и для тензора пьезооптического эффекта (см. § 33.4), для можио воспользоваться сокращенной записью d?", где I в зависимости ***om f u k*** пробегает значения от 1 до 6. В сокращенной записи компоненты поляризации среды записываются в матричной форме

$$(Pjc,\ Py,\ Pzj=' \quad \begin{vmatrix} /rf11 & rfl2 & rfl3 & ^14 \\ & ^22 & rf23 & \\ \backslash rf3i & & & \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 4 \\ EI \\ 2EyE^{\wedge} \\ JE.Ey \end{vmatrix}$$

где ео=8,85-10-'2 Кл/(В-м) — электрическая постоянная; ***Р*** — поляризация, Кл/м'; ***Е*** — напряженность электрического поля, В/м; da — тензор квадратичной нелинейной восприимчивости, м/В.

Число ненулевых членов в тензоре rf?™ зависит от группы точечной симметрии среды. Для различных кристаллических классов вид тензораrf?/™приведен в табл. 33.17.

Мощность излучения второй гармоники определяется соотношением

$$p^{2>} = \qquad f\ m\ .$$

где (О — частота, с-', и Р"" — мощность, Вт, исходного излучения; (Хо= 1,257-10-® В-с/(А-м) — магнитная постоянная; п" и п> — показатели преломления среды для излучения исходной частоты и его второй гармоники; ***L*** — длина пути луча в среде, м; Го — радиус луча, м; ***f(M)*** — функция, описывающая рассогласование волновых векторов исходной световой волны и ее второй гармоники km и к2<а. В тех случаях, когда выполняется условие синхронизма, т. е. 2k&=k2^ или = =а(2и), АА=0 и ***i(Ak) = l.*** Это возможно только в средах, не обладающих дисперсией. В реальных же средах фазовые скорости f((o) и ***v(2ay)*** различны, в силу чего ***M>0*** и ***f(&k)<l.*** Более того, при распространении световых воли в среде значение ***Ak*** постоянно меняется. Поэтому фазовые соотношения между исходной волной и ее гармоникой сохраняются только на некоторой длине, называемой ***когерентной:***

$$/_{,,,}r = \bullet$$

В кристалле кварца, например, /„or всего порядка 10-3 см.

Существенное увеличение /ког достигается при точном выполнении условий синхронизма в анизотропных кристаллах. В них показатель преломления, а следовательно, и фазовая скорость зависят не только от частоты, но и от поляризации волны, поэтому возможно выполнение условий синхронизма на значительно большей длине. При этом в зависимости от выбора поляризации и ориентации кристалла возможны два типа фазового синхронизма. В отрицательных одноосных кристаллах, где показатель преломления для обыкновенной волиы По (волны с поляризацией, перпендикулярной плоскости, проходящей через оптическую ось кристалла и направление луча) больше показателя преломления для необыкновенной волны Пе (волны С поляризацией, параллельной указанной плоскости), в некотором направлении Gi, отсчитываемом от направления оптической оси кристалла,

$$n?" =$$

и в направлении 02

Соответственно для положительных одноосных кристаллов

Для двухосных кристаллов также возможно выполнение фазового синхронизма. Однако и для тех, и для других кристаллов само по себе наличие анизотропии показателя преломления недостаточно. Необходимо, чтобы соответствующие поверхности показателей преломления для исходной длины волны и ее гармоники по крайней мере касались друг друга, т. е. чтобы анизотропия была достаточно большой.

Когерентная длина /ког в реальных условиях эксперимента ие обращается в бесконечность, как этого следовало бы ожидать при выполнении условия синхронизма. Расходимость реальных световых пучков приводит к тому, что часть лучей отклоняется от направления синхронизма, даже если ось пучка точно направлена по этому направлению.

Синхронизм называют ***критическим,*** если направление фазового синхронизма **в** отличается от **90°,** и ***некритическим,*** если **е=90°.** В первом случае поверхности показателей преломления для исходной волны и ее гармоники пересекаются, что соответствует различию в направлениях для групповых скоростей (векторов Пойнтинга) обыкновенной и необыкновенной волн. Во втором направления групповых скоростей коллинеарны (поверхности показателей преломления касаются). Переход от критического синхронизма к некритическому можно осуществить выбором температуры кристалла.

Коэффициенты генерации второй гармоники (элементы тензора d"^) нелинейных кристаллов приведены в табл. 33.18. Элементы тензора d?^ связаны с линейными оптическими восприимчивостями сред через тензор третьего ранга (тензор Миллера)*'.

$$= \qquad '$$

где — в м^/Кл; xw — безразмерные величины; df^^—в м/В. Значения б?™также приведены в табл. 33.18. Характерным является то, что вариации элементов тензора 6?,"-от вещества к веществу значительно меньше, чем вариации для djf

Так как абсолютные или относительные знаки коэффициентов второй гармоники определены только для некоторых кристаллов, то они вынесены в отдельную табл. 33.19.

Таблица 33.17. Форма тензора генерации второй гармоники для различных кристаллографических классов [2]

Сингония	Класс	Форма тензора	Примечание
Триклинная	*1—Ci*	M 1 dia di3 di4 di5 d,6\ d,, d,3 d24 d.6 Vdsi dga dss d34 djs dsg /	–
Моноклинная	*m-Cs*	Mirfi2 di3 0 0 di6\ dai daa das 0 0 da.	*m x z*
	tn—C.,	\0 0 0 d34 dgs 0 7 /dji di3 0 dle 0 ¥ 0 0 0 d24 0 dae	*m XY*
	2-e,	Vdgi d32 das 0 d35 0 / O O O di4 di5 0 \ 1 0 0 0 d24 d25 0	*21] Z*
Ромбическая	*2-C2*	Vdsi Ѵ32 d33 0 0 d36 / / O O O di4 0 d,6\ 1 ^21 daa dsg 0 das 0 \0 0 0 d34 C da,J	*2ilV*
	mm2—	/0 0 0 0 di5 0\ 10 0 0 d24 0 0	
	222-D2	\d3i dsa das 0 0 o/ /0 0 0 di4 0 0 \ 1 0 0 0 0 das 0 \0 0 0 0 0 dae /	—
Тетрагональная		/0 0 0 di4 di5 1 0 0 0 di5 —di4 0 j	—
	4-S4	Vda dsi d33 0 0 ^ 0/ /0 0 0 di4di5 0 \ jo 0 0 —di5di4 0	
	4mni—Cjj,	\d31-d31O 0 0 dae/ /0 0 0 0 di5 0 \ 1 0 0 0 di5 0 0 \0 0 0 0 0 dgg/	–
	42tn-D2d	/0 0 0 di4 0 0 \ l o o 0 0 di4 0 \0 0 0 0 0 ds,J	
	422-Di	/0 0 0 di4 0 0\ I 0 0 0 0 —di4 0 \0 0 0 0 0 0/	–

Продолжение табл. 34.2 Продолжение табл. 34.2

		Форма тензора
Триго наль-	*3-e.*	dli —dn O di4 rfi5 —
Триго-наль-ная	*3m~*	dsi daidssO 0 0 0 0 0 0 di5 —d. —d22 d22 0 di5 0 ^31 dsi dss 0 0 Г) *du —du* 0 0 0 0 di6 0 dsi rfsi das 0 0
	32—Ds	—dti 0 di4 0 0 \ 0 0 0 0 -d,, j ,0 O O O 0 0 /
Гексагональная		*dii -dn* O O O -^22 rf22 0 0 0 —dii j
	6-C,	**0 0** O O O 0 / *f00 (0* 0 di4 di5 0\ 0 0 0 di5 -di4 0 I
	6m2-	Wsi dsi daa 0 0 0/ O 0 O O O —daaN -rf22 d22 0 0 0 0 I 0 0 O O O 0 /
	Dsh	du -dn O O O 0 \ 0 0 0 0 0 -du **,0 0 0 0 0 0** 0 0 0 0 di5 0 **0 0 0 di5 0 0**
	622-D,	*dsi dsi* 0 /0 0 0 di4 0 0 0 0 0 -di4 \0 0 0 0 0 0/
Кубическая	*23-1*	/0 0 0 di4 0 0 \ 0 0 0 0 di4 0 Vo 0 0 0 0 *du/*
	43m~Ta	/0 0 0 *du* 0 0 \ 0 0 0 0 *du* 0 \o 0 0 0 0 *duJ*
		Все члены тензора равны нулю

Таблица 33.18. Коэффициенты генерации второй гармонии по сингониям [2]

Сингония, вещество	Класс	df^, 10-« М/В	i^f, 10-» MVK			(6, град)
Моноклинная:						
лития сульфата моногидрат	2 - e ,	**die = (?)**	–	1,0642	1,4636	1,4624
		= (?)		1,0642	1,4521	1,4868
Li,S04 • H^O		**d22 = 0,46±0,07**	–	1,0642	1,4657	1,4868
		d23 = 0,33±0,05	–	1,0642	1,4752	1,4868
		d34 = 0,29±0,04	–	1,152	1,4704	
калия битартрата гидрат	2 - C ^	d2i = 0,13	0,68	0,6943	1,4893	1,5693
K2QH4O6 • V2H2O		d22 = 4,26	19,2	0,6942	1,5194	1,5693
		d 2 3 = o	0	0,6942	1,5294	1,5693
		d^5=0,19	0,93	1,152	1,5043	1,5693 (20; 40)
триглицинсульфат (TGS)	***2-e,***	d23 = 0,33	1,09	0,6943	1,567	1,618
(NH2CH2C00H)3 • Hs,S04						
Ромбическая:						
аммония биоксалата моногидрат	***222-D2***	**di4 = 0,43**	BI4=2,2	**1,06**	1,4802	**1,5996**
(NH4)2C204 • H^O		**-^(d26 + d3e) =**	–	1,06	–	–
		= (0,78±0,07)				
гадолиния молибдат	**mm2—C2v**	**di5 = 2,98±0,45**	B„ = 2,44+0,37	1,0642	1,8386	1,8549
Gd2(Mo04)3		**d24 = 2,93±0,44**	B24 = 2,4±0,36	1,0642	1,8384	1,8545
		dsx = 2,83±0,42	B3l = 2,30±0,34	1,0642	1,8146	1,9102
		d32 = 2,75±0,41	832 = 2,24+0,34	1,0642	1,8142	1,9102
		d33 = 0,05±0,009	6ззз = o,o4±o,oo7	1,0642	1,8637	1,9102
гиппуровая кислота	***222-D2***	d36 = 2,85	6I4 = 7,16	0,6943	1,644	1,61
C6H5Co-ЫH(CH2Co2H)						
(х-иодноватая кислота	***222—D2***	**di4 = 7,28±1,8**	BI4 = 4,43±1,09	1,064	1,9391	1,8547 (24; 41,5)
a-HIO3		d,4 = 4,83±0,9	Bi4 = 3,02±0,56	1,1526	1,935	1,845
калия дигидрофосфат	mm2—C2z,	**di5 = 0,57±0,05**	Bi5 = 3,3+0,3	0,6943	1,4906	1,540
(КОРЖНгРОа при Т< <-150°С		**d24 = 0,38±0,05**	&24 = 2,2±0,3	0,6943	1,4906	1,540
		doi =0,58±0,05	Bnl =3,4+0,3	0,6943	1,5117	1,4917
		d32 = 0,39±0,05	B832 = 2,3±0,3	0,6943	1,5117	1,4917
		d33 = o	B з з = 0	–	1,4694	1,4917
литий метагадолиниево-кислый	***tnm2***—C2v	diB = ***dsi*** = = 0,08d=0,009	0,1±0,01	1,0642	1,7433	1,7705
LiGdOa		d24 = d32 =0,175 + ±0,019	o,25±o,o27	1,0642	1,7131	1,7705
		d33 = 0,686±0,07	B33 = 0,88+0,09	1,0642	1,7399	1,7705
лития формиата моногидрат	***mm2***—C2v	dis = d3i =	Bц = 1,33+0,24	1,0642	1,3593	1,5229 (81-95)
LiCHOg • H2O		= (0,11 ± 0,02)				
		d,4 = doo = = 1,27+0,09	**8x2** = 8,19±0,6	1,0642	1,4673	1,5229(55,1)
		d 3 = 1,86+0,11	833 = 10,03+0,6	1,0642	1,5035	1,5229
натрия-бария ниобат	***mm2***—C2v	di5 = 14,56+0,73	815= 2,35+0,11	1,0642	2,2133	2,3655
BagNaNbgOis		d24= 13,83+0,73	B24 = 2,23±0,11	1,0642	2,2140	2,3672
		d3i = 14,56+0,73	**8x1 = 2,42±0,12**	1,0642	2,2567	2,2502 (73-75)
		d3s, = 14,56±1,46	Bз, = 2,41+0,16	1,0642	2,2580	2,2502 (75-77)
		d33 =20+1,46	Bзз = 4,06+0,30	1,0642	2,1700	2,2502
натрия нитрит NaNOg	***mtn2—C^***	**dgi = *dib* = 0,2**	0,88	1,153	1,629	1,4124 ^
		dgz = ^24 = o.87	15,73	1,153	1,3391	1,4124
поливинилиденфторид	***mm2***—C2v	**d3i = 0,18**	8x1 = 1,9	1,064	–	-1,43
		ds2 — 0	Bx2 = 0	1,064	Z	
		d33 ^0,36	Йзз 3,8	1,064		—
свинца ниобат РЬЫЪОцЦ	***mm2***—C2v	di5 = 6,7±i,0	B^, =0,84+0,12	1,0642	2,3115	2,4113
		d24 = 6,17+0,93	**B24 = o,76±o**,11	1,0642	2,3131	2,4137
		d3i = 7,4+ 1,1	Bxl = 0,93±0,14	1,0642	2,2979	2,4396
		d32 = 6,68±1,00	**B32** = 0,83±0,12	1,0642	2,3010	2,4396
		das = 10,1±1,5	833= 1,19±0,18	1,0642	2,3254	2,4396
d-треонин'	***222—D2***	**di4 = 0,45+0,07**	Bi4= 1,72+0,27	1,0642	1,5821	1,5243
		dae = 0,49±0,07	B26 = 1,86±0,27	1,0642	1,5471	1,5965
		dg =0,46±0,07	&зв = 1,74+o,27	1,0642	1,5440	1,6043

Сингония, вещество							
тербия молибдат Tb2(M0O4)з		2,87it0,43		: 2,26+0,34	1,0642	1,8459	1,8649
		$d_{,4}$ = 2,9+0,4		^2,33d=0,32	1,0642	1,8458	1,8645
		do. = 2,6+0,4		: 2,08+0,32	1,0642	1,8226	1,9185
		d32 = 2,52+0,38		1,98+0,30	1,0642	**1,8222**	1,9185
		4 з = 0,12+0,03		**: 0,08+0,02**	1,0642	1,8704	1,9185
Тригональная:							
алюминия фосфат A1PO4	32-O3	$d_{,,}$ = (0,41d=0,03)		2,07+0,15	1,0582	1,5156	1,5275
		di4 ~ 0,009		0,046	1,0582	1,5198	1,5275
бензил CeHsCOCOCeHs	***32—Оз***	d n = (4,08+0,55)		9,36+1,26	1,0642	1,6313	1,669
калия дитионат K2S2O4	***32—Di***	$d_{,,}$ = 0,087+0,015	Вц =	0,69+0,12	0,6943	1,4518	1,4728
а-кварц	***32—Di***	$d_{,,}$ = (0,4+0,02)		1,86+0,9	1,0582	1,532	1,542
a-Si02		$d_{,4}$ = 0,009	6x4 =	0,14	1,0582	1,536	1,542
		$d_{,,}$ = 0,364+0,04		1,6+0,2	1,0642	1,5341	1,5468
лития ниобат LiNbOs	3/я—Сзг,	d22 =(3,07+0,28)		0,497+0,045	1,0582	2,2322	2,3241
		d3i =(5,82+0,85)		1,04+0,15	1,0582	2,2322	2,2325
		d33 =(40,68+10,4;		8,7+2,2	1,0582	2,1544	2,2325
		dgi =(5,01+0,47)		0,92+0,09	1,152	2,2278	2,2153
		=(2,41+0,95)	**1** =	0,4+0,16	1,152	2,2278	2,3037
		di6 = (6,28+0,63)		1,18+0,12	0,6328	2,1854	2,2854
		d33 = (30,27+7,57]	^33 =	6,7+1,7	1,152	2,1506	2,2153
лития танталат LiTaOs	***3m—Czy***	d22 =(2,08+0,24)	?22 =	0,48+0,06	1,0582	2,1366	2,2043
		dai =(1,28+0,24)		0,29+0,06	1,0582	2,1366	2,2089
		d33 =(19,39+2,36)		4,4+0,53	1,0582	2,1406	2,2089
	3m—Csv	dgi =(12,6+4)	831 =	0,58+0,18	**10,6**	2,7352	2,6221
		dao = (13,4+4)	^22 =	0,55+0,16	10,6	2,7352	*m i '*
прустит AfeAsSs	***3m-Cs^***	d3i= (15,08+2,2)		0,64+0,09	1,152	2,8042	2,5731 (90)
		di5 + =			**10,6**		-2,728
		= (28,38+1,8)					(22,5±5)
ртут^сульфил	***32—Вя***	du = 50,3+17	=	2,93+1	**10,6**	2,596	2,624
селен Se	***32—Ds***	d u = 79,6+42	=	4,2+2,2	10,6	2,64	2,645 (10)
теллур Te	***32 D3***	du = (5319,8+ +837,7)	=	1,07+0,17	10,5915	6,243	6,305 (14,16)
турмалин	***3m—Csv***	di5 = 0,27+0,04	=	0,70+0,1			1,6433
		djg = 0,08+0,01	=	0,22+0,03		1,6274	1,6433
		dgi = 0,16+0,03	=	0,42+0,08		1,6274	1,6231
		dgg = 0,57+0,07	=	1,58+0,19		**1,6088**	1,6231
Гетрагональная:							
аммония дигидрофосфат (ADP) NH4H,P04	***42m—D^a***	di4= 0,553it0,024		3,19+0,14		1,4874	1,5277
		dgg = 0,558+0,028		3,27+0,16		1,5067	1,4816 (41,9+1)
		di4= 0,482+0,024		: 2,52+0,12	0,6943	1,4973	1,5498
		d3(.- 0,487+0,028		: 2,57+0,15	0,6943	1,5193	1,5004 (51,9+1)
		dgg = 0,544+0,14		: 3,25+0,84	1,15	1,50364	1,4794
		d3o= 0,57+0,068		2,93+0,35	0,6328	1,5217	1,5075
		d3e = 0,66+0,14		: 3,65+0,77	0,8250	1,5145	1,4907 (42)
аммония дидейтерофосфат (ADDP) ND4D2PO4	***42m—D^a***	d3e = 0,52+0,08		: 2,88+0,44	0,6943	1,5138	1,4926 (47)
бария титанат BaTiOs	***4mm—C^z,***	di5= 17,2it1,42		1,98+0,16	1,058		
		d3i= 17,97+1,42		2,11+0,17	1,058		
		ds3= 6,6+0,5		0,85+0,06	1,058		
		= 19,33+2,0		2,23+0,23	1,0642	2,3175	2,4760
		$d_{,,}$ = 17,85+2,0		2,10+0,23	1,0642	2,3379	2,4128
		d33 = 7,79+1,17		1,0+0,15	1,0642	2,2970	2,4128

			sjf, 10=^ м2/К		п"	,2ш	град)
бария-стронция ниобат Sro.,5Ba9 5Nb20,		dj, = 4,9+1,5	**0,78+0,24**	1,0642	2,2506		
		d33 = 12,85±3,f	**2,20+0,65**	1,0642	2,2138		
		dj5 = 6,8+2,3	**Bi5 = 1,07+0,c**	1,0642	2,2322		
бериллия сульфата тетрагидрат BeS04-4H20	*42m—D^d*	d3e= 0Л6	бзь = (?)	0,6328			
кадмия-ртути тиоцианат Cd[Hg(SCN),]	*4-S^*	dg, = 6,0+2,4	Bg, = 4,21 + 1,69	1,06	1,924		
		d,, = 7,57+1,4	031 = 5,3+0,98	1,064	1,924		
		dg» == 1,76+0,53	83, = 1,23+0,37	1,064	1,924		
калия дидейтерофосфат (KDDP) KD,P04	*42m—D^a*	di. = 0,5+0,02	Bi4 = 3,23+0,13	1,0582	1,4789		
		dge = 0,5+0,02	03, = 3,24+0,13	1,0582	1,4978		
		di4= 0,46+0,04	Bi4 = 2,71+0,23	0,6943	1,4830		
		dgj = 0,5+0,02	03. = 3,04+0,12	0,6943	1,5022	**1,4855**	**(52)**
калия дигидроарсенат	*42m—D^a*	di4 = 0,55+0,02	Bi4 = 2,35+0,08	1,0582	1,531	**1,572**	
		rise = 0,52+0,03	B36 = 2,24+0,13	1,0582	1,554	**1,521**	
		di4 = 0,41+0,05	Bi4 = 1,58+0,19	0,6943	1,538	1,606	
		dg. = 0,47+0,05	B3. = 1,83+0,19	0,6943	1,562	**1,549**	
калия дигидрофосфат (KDP) KH2PO4	*42171—D^a*	d,4= 0,49+0,02	Bi4 = 3,10+0,13	1,0582	1,4751	**1,5123**	
		d3e = 0,47	B36 = 3,02+0,2	1,0582	1,4939	**1,4706 (40.3)**	
		di4= 0,47+0,03	Bi4 = 2,71+0,17	0,6943	1,4856	**1,5335**	
		d3j= 0,47	B35 = 2.73	0,6943	1,5058	**1,4874 (50.4)**	
		d3e= 0,46d=0,07	Вз, = 3,01d=0,46	1,15	1,4913	**1,4687**	
		d„„= 0,47+0,03	B3. = 3,01+0,2	1,0642	1,4942	**1,4708**	
калия-лития ниобат KsLi^NbsOis	*4mm—C4г,*	dj = 6,2+1,1	Bi5 = 1,19+0,2	1,0642	2,1585	**2,3297**	
		dgj = 7,0+1,5	Б31 = 1,38+0,3	1,0642	2,2057	**2,1980**	
		12,7+1,8	B33 = 3,14+0,44	1,0642	2,1113	**2,1980**	
калия-натрия-бария ниобат KogNao^^Ba^NbsOis	*4mm—Сц^*	12,77	B3X = 2,22	1,0642	2,2601	**2,2007**	
рубидия дигидроарсенат (RDA) RbH^AsOj	*42m—D^a*	dgj- 0,3+0,04	Взе = 1,27+0,17	0,6943	-1,555		
рубидия дигидрофосфат (RDP) RbHaPOi	*42m—D^a*	dg, = 0,49	Вз,= 2,83	0,6943	1,502	**1,4969**	**(66)**
		di4 = 0,56+0,08	0,4 = 3,47+0,49	1,0642	1,4813	**1,5106**	
		d„ = 0,43+0,05	B3. = 2,74+0,32	1,0642	1,4926	**1,4811**	
свинца титанат PbTiOg	*4mm—C*	d,5= 37,9+5,7	Bi5 = 2,09+0,3	1,0642	2,5704	**2,7398**	
		d3i= 42,8+6,4	B31 = 2,39+0,36	1,0642	2,5712	**-2,7260**	
		d33= 8,5+1,4	B33 = 0,48+0,08	1,0642	2,5692	**2,7260**	
серебра тиогаллат AgGaSa	*42m-D^a*	di4= 56,5+19	Bi4 = 7,17+2,4	10,6	2,316	**2,383**	
цезия дигидроарсенат CSH2ASO4	*42m-D^*	dgg = 0,25+0,04	Взв = 0,93+0,15	0,6943 1,06	1,563		
цинка-германия фосфид ZnGePj	*42m—D^a*	di4= (111+33)	Bi4 = 1,96+0,58	10,6	3,094		
Гексагональная:							
бериллия окись BeO		d3i= 0,17+0,01	B31 = 0,26+0,015	1,0642	1,7055		
		d33= 0,23+0,01	Bs3 = 0,34+0,015	1,0642	1,7204		
кадмия селенид CdSe	*6mm—*	d33= 79,6d=4,9	B33 = 3,54+0,22	1,058	2,560		
		di5= 31±7,5	Bi5 = 2,8+0,67	10,6	2,453		
		dgi = 28,5+6,3	B31 = 2,56it0,57	10,6	2,445		
		dgg = 54,5+12,6	B33 = 4,73+1,09	10,6	2,462		
кадмия сульфид CdS		17,0+1,4	Bi5 = 1,62d=0,13	1,0582	2,336		
		d3i= 15,6+0,9	B31 = 1,5+0,09	1,0582	2,327		
		d33 = 30,7+1,9	B33 = 2,83+0,17	1,0582	2,345		
		di6= 28,9+7,1	Bi5 = 4,88+1,2	10,6	2,252		
		41=26,4+6,3	B3, = 4,45+1,06	10,6	2,242		
		d33 = 44,0+12,6	B33 = 7,1+2,0	10,6	2,263		
кремния карбид SiC	*6mm—C»*	dj5= 9,1 + 1,1	0l6 = 0,50+0,06	1,0642	2,6027		
		dgi = 9,83+1,1	B31 = 0,54+0,06	1,0642	2,5830		
		d33= 16,4+1,8	B33 = 0,84+0,09	1,0642	2,6225		

Сингония, вещество	Класс	d f1, м/В	o^^, 10-2			(6, град)
лития иодат LilOg	б—Ce	dgi = 5,2+0,7 dsi = 5,6+0,3 йзз = 5,86+0,36	831 = 4,8+0,65 631 = 5,05+0,3 C33 = 8,37+0,51	1,0845 1,0642 1,0642	1,856 1,86 1,719	1,746 (28,9) 1,750 (30,2) 1,750
лития-калия сульфат LiKSOa	б - C e	dsi = 7,5+1,1 dgi = 0,38 d33 = 0,71	831 = 6,79+1,0 631 = (?) B33 = (?)	0,5145 0,6943 0,6943	1,7876 — —	1,9018
цинка окись ZnO		d,5 = 2,32+0,2 d3i = 2,1+0,2 d33 = 7,0+0,2	= 1,08+0,09 = 0,98+0,09 C33 = 3,16+0,09	1,0582 1,0582 1,0582	1,947 1,939 1,955	2,031 2,048 2,048
цинка сульфид ZriS	***6mm—C^s***	d33 = 13,5+0,8 di5 = 21,4+8,4 d3i = 18,85+6,3 d33 = 37,3+12,6	B33 = 1,74+0,1 Ojs = 3,42+1,34 S31 = 3,01 + 1,0 B33 = 5,89+1,99	1,058 10,6 10,6 10,6	2,299 2,266 2,264 2,269	2,403 2,265 2,270 2,270
Кубическая:						
алюминия антимонид AlSb	***43m—Ta***	di4 = 49+36	614 = 0,4+0,29	1,058	3,3	3,87
висмута германат Bi4GeOi2	***^m—Ta***	di4 = 1.46	Bl4 = 0,47	1,0642	2,0443	2,1152
галлия антимонид GaSb	***43m—Ta***	di4 = 628+63	Bi4 = 2,84±0,28	10,6	3,8	3,82
галлия арсенид GaAs	***43m—Ta***	di4 = 274+66 d3e = 249+15 di4 = 188,5+19 = 140+10 di4 = 137	Bi4 = 1,4+0,34 S36 = 1,27+0,08 Oi4 = 2,26+0,23 8^4 = 0,72+0,05 gj^ = 0,31	1,0582 1,058 10,6 1,06 0,8485- 0,8450	3,479 3,479 3,27 3,478 3,60	4,352 4,352 3,30 4,346 5,90
галлия фосфид GaP	***43m—Ta***	di4 = 85,6+14,2 йзе = 41,2+2,5 di4 = 35,0 di4 = 109	Bi4 = 1,14+0,19 B3, = 0,55+0,03 Bu = 0,73 8i4 = 1,9	1,058 1,058 10,6	3,10 3,10 3,018 3,00	3,49 3,49 3,04 3,01
индия антимонид InSb	***43m—Ta***	di4 = 520+47	Bi4 = 1,8	1,058	—	—
индия арсенид InAs	***43m—Ta***	d,4 = 364+47 di4 = 418,9+12,6	814 = (?) 014 = 3,27+0,1	1,058 10,6	3,49	3,54
индия фосфид InP	***43m—Ta***	di4 = 167,0	Bi4 = 0,94	1,058	3,44	4,24
кадмия теллурид CdTe	***43m—Ta***	16,7+6,3	ЙI4 = 0,76+0,29	10,6	2,69	2,71
меди бромид CuBr	***13m—Ta***	dj4 = 7,96+2,7 di4 = 15,3+6,9	8,4 = 3,73+1,27 = 5,07+2,28	10,6 1,064	1,970 2,011	1,972 2,164
меди хлорид CuCl	***43m—Ta***	di, = 4,19 ^4 = 9,1 + 4,1	Bi4 = 2,74 8i4 = 4,64+2,09	10,6 1,064	1,893 1,923	1,895 2,012
меди иодид Cul	***43m—Ta***	di4 = 7,96+2,6 30,2+13,6	Bi4 = 1,72+0,56 8^4 = 4,65+2,09	10,6 1,064	2,176 2,223	2,178 2,392
иатрия бромат XaBrOз	***23-T***	di4 = 0,28	***hi*** = 0,71	0,6943	1,611	1,661
иатрия хлорат NaClOs	***23-T***	di4 = 0,69	= 3,43	0,6943	1,512	1,540
уротоопии N4(CH2)e	***43m-T,***	di4 = 4,73	ЙI4 = 15,7	1,06	1,577	1,593
цинка селенид ZnSe	***43m—Ta***	йзв = 31,7+1,95 = 78,3+29,3	Bgg = 2,21+0,14 8^4 = 7,6+3	1,058 10,6	2,48 2,42	2,66 2,43
цинка сульфид fi-ZnS	***43m—T^***	йзе = 24,6+1,5 30,6+8,4	Bзв = 3,2+0,19 Bi4 = 5,08+1,39	1,058 10,6	2,289 2,25	2,40 2,26
цинка теллурид ZtiTe	***43m—Ta***	dgg = 106,7+6,6 di4 = 94,6+9,5 di4 = 92,1+33,5	Bзв = 2,96+0,18 = 2,62+0,26 811 = 4,19+1,5	1,058 1,058 10,6	2,772 2,772 2,69	3,182 3,182 2,70

Таблица 33.19. Знаки коэффициентов генерации второй гармоники [2]

Вещество	rfii	d.4			dk2		Вещество	di,	Й4				
Бария-натрия ниобат				—		—	Лития формиата моногидрат						+
Бария титанат				–		–	Лития галлат				–	-f	
Бериллия окись				–		–	Лития иодат				–		–
Гадолиния молибдат					+	–	Лития нинобат			+	–		
Галлия антимонид							Лития танталат				·—		
Галия арсенид		+					Меди хлорид		-1-				
Галлия фосфид		ч					Натрия нитрит				dr	±	
Индия арсенид							Свинца ниобат				±	±	±
Кадмия селенид				±			Свинца титанат				±		±
Кадмия сульфид				–		-f	Тербия молибдат				–	+	–
Кадмия теллурид		–					Цинка окись				-j-		–
Калия дигидрофосфат		+					Цинка селенид		+				
Кварц	+						1 Цинка сульфид		+		–		+
Кремния карбид				=F		±	11 Цинка теллурид		+				

ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В табл. 33.20 представлены данные по показателям преломления нелинейных кристаллов. Для двуосных кристаллов принято, что главные показатели преломления соотносятся как

Буквами ***а, Ь, с*** обозначены кристаллографические, а ***Ж Y, Z*** — пьезоэлектрические оси кристаллов. В ряде случаев даны дисперсионные соотношения и изменения показателей преломления с температурой. В этих формулах Я, V и Г представляются соответственно в мкм, СМ-" и К.

Таблица 33.20. Показатели преломления нелинейных кристаллов [2]

Алюминия фосфат А1ГО4

	«0		>-, МКМ	"0	
0,4	1,5369	1,5465	1,4	1,5112	1,5198
0,5	1,5287	1,5385	1,6	1,5088	1,5174
0,6	1,5243	1,5334	1,8	1,5062	1,5145
0,7	1,5215	1,5301	2,0	1,5034	1,5116
0,8	1,5192	1,5281	2,2	1,5001	1,5083
1,0	1,5161	1,5245	2,4	1,4969	1,5048
1,2	1,5136	1,5223	2,6	1,4928	1,5006

Аммония Дигиброфосфат ADP NH4H2PO4

МКМ	Пц	***"е***
0,2138560	1,62598	1,56738
0,2288018	1,60785	1,55)38
0,2536519	1,58688	1,53289
0,2967278	1,56462	1,51339
0,3021499	1,56270	1,51163
0,3125663	1,55917	1,50853
0,313)545	1,55897	1,50832

Продолжение табл. 33."Ю

	«0	
0,3341478	1,55300	1,50313
0,3650146	1,54615	1,49720
0,3654833	1,54608	1,49712
0,3662878	1,54592	1,49698
0,3906410	1,54174	
0,4046561	1,53969	1,49159
0,4077811	1,53925	1,49123
0,4358350	1,53578	1,48831
0,4916036		1,48390
0,5460740	1,52662	1,48079
0,5769590	1,52478	1,47939
0,5790654	1,52466	1,47930
0,6328160	1,52166	1,47685
1,013975	1,50835	1,46895
1,128704	1,50446	1,46704
1,152276	1,50364	1,46666

4 = 2.302484+ 1,117089 -1О-Wv^^1 - v2/7,605372x

ХЮ») + 3,751806-10'!/(2,5-105

п1 = 2,163077 + 9,670312- Ю"" v2/(1 _ v2/7,785289x

X 10») + 1,451540- 10в/(2,5-10^ — v^);

Дпо = (***4%*** — 3,0297 По -f 2,3004)-0,713-10-^ (298 - ***Т)***

Дп^ = п2 (0,675-1О-в) • (298 — ***Т).***

Аммония дидейтерофосфат ADDP ND4D2PO4

X, МКМ	%	il		"0	***"е***
0,350	1,5414	1,4923	U,690	1,5142	1,4737
0,530	1,5198	1,4784 1	1,060	1,5088	1,4712

Продолжение табл. 33..

Аммония биоксалата моногидрат (NH4)2C204-H20

X, мкм	п«=z	"9=У	«т=х
0,4471	1,4460	1,5599	1,6119
0,4713	1,4447	1,5561	1,6084
0,4922	1,4435	1,5544	1,6050
0,5016	1,4426	1,5536	1,6037
0,5461	1,4406	1,5493	1,5993
0,5780	1,4391	1,5470	1,5965
0,5876	1,4388	1,5469	1,5952
0,6678	1,4362	1,5426	1,5892
0,7016	1,4352	1,5408	1,5874
1,014	1,4295	1,5312	1,5763
1,129	1,4276	1,5284	1,5728
1,367	1,4235	1,5222	1,5652

Бария титанат BaHOз

1. «км	*"а*	*"«е*	*л, мкм*	*«о*	
0,4579	2,5637	2,4825	0,5321	2,4760	2,4128
0,4765	2,5355	2,4605	0,6328	2,4164	2,3637
0,4880	2,5206	2,4487	1,0642	2,3379	2,2970
0,5145	2,4917	2,4255	2,1284	2,2947	2,2593

«2 - 1 =4,239 — (0,2229)3]

' 1 = 4,0854 X2/[>2 _ (0,2087)2].

Бария-натрия ниобат BajNaNbeOib

X, мкм	Z		"т = " = к
0,4579	2,2931	2,4266	2,4284
0,4765	2,2799	2,4076	2,4094
0,4880	2,2727	2,3974	2,3991
0,4965	2,2678	2,3903	2,3920
0,5017	2,2649	2,3862	2,3879
0,5145	2,2583	2,3767	2,3786
0,5321	2,2502	2,3655	2,3672
0,6328	2,2177	2,3205	2,3222
1,0642	2,1700	2,2567	2,2580

п 1 - \ = 3,6008 _ (0,17944)2];

п1—\ = 3,9495 -(0,20035)2];

«2 _ 1 =3,9495 — (0,20097)2].

Бария-калия-натрия ниобат Kj^Nai-^BagNbijOis

= 3,6680+ 24,681/[(4,3004)2_(1 ,2394/X)2];

= 2,9198 + 46,737/1(5,1605)2 — (1,2394/X)2] при 22''С.

Продолжение табл. 33.20

Бензил (QH6)2-(CO)2

мкм	"о	"е	X. мкм	«о	
0,4205	1,737	1,737	0,5461	1,667	1,684
0,4358	1,716	1,720	0,5780	1,660	1,680
0,4380	1,712	1,718	0,5893	1,658	1,679
0,4620	1,694	1,705	**0,6560**	1,648	1,672
0,4860	1,682	1,695			

п| - 1 = 1,08 + 0,535 л2/[X2 — (0,24)2] +о,0150X2/[X2_ — (0,398)2]; - 1 = 1,35 + 0,370 >2/[X2 — (0,24)2] + 0,0138 X2/[X2_ (0,395)2].

Бериллия оксид BeO, 22,4=C

X, мкм	"о	
0,430	1,73039	
0,440	1,72924	1,74556
0,450	1,72820	1,74447
0,460	1,72725	1 74348
0,470	1,72626	1 74251
0,480	1,72542	1 74162
0,490	1,72460	1,74073
0,500	1,72388	1,74002
0,510	1,72308	1,75918
0,520	1,72249	1,73852
0,530	1,72177	1,73779
0,540	1,72121	1,73703
0,550	1,72062	1,73644
0,560	1,72006	1,73588
0,570	1,71950	1,73530
0,580	1,71903	1,73477
0,590	1,71856	1,73423
0,600	1,71795	1,73381
0,610	1,71762	1,73322
0,620	1,71710	1,73279
0,630	1,71668	1,73233
0,640	1,71632	1,73191
0,650	1,71589	1,73156
0,660	1,71554	1,73113
0,670	1,71517	1,73075
0,680	1,71482	1,73041
0,690	1.71450	

1 = 1,919087 л2/(X2_ 0,00727575)+3,972323A2/(X2_ — 199,31087); /r^ _ 1 = 1,972142 X2/(X2 _0,00748564) + +17,5787 X2/(X2 —779,49122).

Висмута германат Bi^GeOu

0,4765	2,142	0,5321	2,115,
0,4880	2,135,	0,6328	2,086i
0,4965	2,131.	1,0642	2.044з
0,5017	2,1285		
0,5145	2,123-		

п 2 - - 1 =3,085 2/(X2—0,01337),

Продолжение табл. S3.20

Гадолиния молибдат Gda (Mo04)з

Л, мкм	"а = У		
0,4579	1,8758	1,8762	1,9342
0,4765	1,8694	1,8699	1,9270
0,4880	1,8659	1,8663	1,9229
0,4965	1,8634	1,8639	1,9201
0,5017	1,8621	1,8625	1,9185
0,5145	1,8588	1,8593	1,9148
0,5321	1,8545	1,8549	1,9102
0.6328	1,8385	1,8390	1.8915
1,064	1,8142	1,8146	i;8637

n l - l =2,2450X2 /(X^-0,022693)

: 2,24654 XV(X2 - 0,0226803); n^ - 1 = 2,41957X2/(X2 • - 0,0245458).

Галлия арсенид GaAs

X, мкм	1		
1,127	3,455	1,550	3,375
1,239	3,425	1,652	3,366
1,377	3,400		

Галлия фосфид GaP

X, мкм	„	>,.мкм	,,
0.5	3,4595	1,8	3,0439
06	3,3495	2,0	3,0379
P7	3,2442	2,2	3,0331
0,8	3,1830	2,4	3,0296
0,9	3,1430	2,6	3,0271
1,0	3,1192	2,8	3,0236
1,1	3,0981	3,0	3,0215
1,2	3,0844	3,2	3,0197
1,4	3,0646	3,4	3,0181
1,6	3,0509	3,6	3,0166
		3,8	3,0159
		4,0	3,0137

Германия-цинка фосфид ZnGeP

1, мкм	«о	
0,64	3,5052	3,5802
0,66	3,4756	3,5467
0,68	3,4477	3,5160
0,70	3,4233	3,4885
0,75	3,3730	3,4324
0,80	3,3357	3,3915
0,85	3,3063	3,3593
0,90	3,2830	3,3336
0,95	3,2638	3,3124
1,00	3,2478	3,2954
1,20	3,2054	3,2493

Продолжение табл. 34.2 ***Продолокение табл.*** *34.2*

л, мкм	«о	
1,40	3,1820	3,2244
2,00	3,1490	3,1889
2,40	3,1388	3,1780
3,00	3,1304	3,1693
3,40	3,1263	3,1647
4,00	3,1223	3,1608
4,50	3,1186	3,1561
5,00	3,1149	3,1533
6,00	3.1101	3.1480
7,00	3,1040	3,1420
8,00	3,0961	3,1350
9,00	3,0880	3,1272
10,00	3,0788	3,1183
11,00	3,0689	3,1087
12,00	3,0552	3,0949

Индия антимонид InSb

—	i		«
7,87	4,0	15,13	3,88
8,00	3,99	15,79	3^87
9,01	3,96	16,96	3,86
'0,06	3,95	17,85	3,85
11,01	3,93	18,85	3,84
12,06	3,92	19,98	3,82
12,98	3,91	21,15	3,81
13,90	3,90	22,20	3,80

Кадмия селенид CdSe

	"о	
0,8	2,6448	2,6607
0,9	2,5826	2,6027
1,0	2,5502	2,5696
1,2	2,5132	2,5331
1,4	2,4929	2,5133
1,6	2,4818	2,5008
1,8	2,4732	2,4930
2,0	2,4682	2,4873
2,2	2,4642	2,4840
2,4	2,4612	2,4798
2,6	2,4590	2,4784
2,8	2,4562	2,4757
3,0	2,4542	2,4741
3,2	2,4532	2,4726
3,4	2,4518	2,4714
3,6	2,4509	2,4702
3,8	2,4498	2,4694
4,0	2,4491	2,4685

Продолжение табл. 33.20

Кадмия сульфид CdS

л, мкм	«0	
0,5120		2,751
0,5130		2,743
0,5140		2,737
0,5150	2,743	2,726
0,5160	2,735	2,720
0,5170	2,727	2,714
0,5180	2,718	2,706
0,5190	2,709	2,702
0,5200	2,702	2,698
0,5210	2,700	2,694
0,5220	2,694	2,689
0,5230	2,687	2,685
0,5240	2,681	2,680
0,5250	2,674	2,675
0,5275	2,661	2,665
0,5300	2,649	2,654
0,5325	2,638	2,644
0,5350	2,628	2,637
0,5375	2,617	2,628
0,5400	2,609	2,622
0,5425	2,602	2,612
0,5450	2,594	2,606
0,5475	2,587	2,600
0,5500	2,580	2,593
0,5750	2,528	2,545
0,6000	2,493	2,511
0,6250	2,467	2,484
0,6500	2,446	2,463
0,6750	2,427	2,446
0,7000	2,414	2,432
0,7500	2,390	2,409
0,8000	2,374	2,392
0,8500	2,364	2,378
0,9000	2,359	2,368
0,9500	2,341	2,359
1,0000	2,334	2,352
1,0500	2,328	2,346
1,1000	2,324	2,340
1,1500	2,320	2,336
1,2000	2,316	2,332
1,2500	2,312	2,329
1,3000	2,309	2,326
1,3500	2,306	2,323
1,4000	2,304	2,321

Кадмия теллурид CdTe

л, мкм		X, ьмкм	
0,903	2,91	7,0—10,0	2,69
1,0	2,84	10	2,69
1,1	2,81	14,0	2,69
1,0-1,3	2,82		

«2 _ 1 = 4,68+ 1,53 —0,366)

Кадмия-ртути тиоцианат Cd[Hg(SCN)4], 27°C

	"o	
0,530	2,003	1,792
0,633	1,970	1,753
1,06	1,924	1,728

Продолжение табл. 33.20

Калия битартрат KsCaHaOj-Cl/S) HgO

л, мкм	«a	«p	"т
0,3650	1,5156	1,5487	1,5630
0,4047	1,5090	1,5409	1,5541
0,4358	1,5049	1,5368	1,5494
0,5461	1,4961	1,5271	1,5384
0,5780	1,4945	1,5253	1,5363
1,014	1,4846	1,5142	1,5238
1,129	1,4832	1,5127	1,5218
1,367	1,4809	1.5102	1,5183

Калия дигидроарсенат KDA KHj ASO4

X, мкм	"o	"•e	мкм	"o	
0,4861	1,5762	1,5252	0,5893	1,5674	1,5179
0,5460	1,5707	1,5206	0,6563	1,5632	1,5146

Калия дигидрофосфат K DP KH2PO4

л, мкм	«o	
0,2138560	1,60177	1,54615
0,2536519	1,56631	1,51586
0,2800869	1,55263	1,50416
0,2980628	1,54618	1,49824
0,3021499	1,54433	1,49708
0,3035781		1,49667
0,3125663	1,54117	1,49434
0,3131545	1,54098	1,49419
0,3341478		1,48954
0,3650146	1,52932	1,48432
0,3654833	1,52923	1,48423
0,3662878	1,52909	1,48409
0,3906410		1,48089
0,4046561	1,52341	1,47927
0,4077811	1,52301	1,47898
0,4358350	1,51900	1,47640
0,4916036		1,47254
0,5460740	1,51152	1,46982
0,5769580	1,50987	
0,5790654	1,50977	1,46856
0,6328160	1,50737	1,46685
1,013975	1,49535	1,46041
1,128704	1,49205	1,45917
1,152276	1,49135	1,45893
1,357070	1,48455	
1,523100	—	1,45521
1,529525	–	1,45512

«2 =2,259276 + 1,008956- Ю-ю v2/(1 _ v2/7,726408x

X 10-11 V2/(1_V3/7,14263M0») + 8,069981-10V(2,5-10!5-_-v2);Aп„=0,402-10-4. ("o " ^ '^32) (298 — T); Дя^ = = 0,221-IO-^x («2 - 1,105)(298-Г).

Продолжение табл. 33.20

Калия дидейторофосфат KDDR KD2PO4

мкм	"o	
0,4047	1,5189	1,4776
0,4078	1,5185	1,4772
0,4358	1,5155	1,4747
0,4916	1,5111	1,4710
0,5461	1,5079	1,4683
0,5779	1,5063	1,4670
0,6234	1,5044	1,4656
0,6907	1,5022	1,4639
1,000	1,4700	1,4400

Дно = 0,228 • 10-' [n l - 1 ,047) (298 — Г);

= 0,955- 10-5 nf (298 — *Т).*

Калия дитионат K₂S₂O»

	%	
0,313	1,480	1,568
0,334	1,475	1,557
0,365	1,470	1,546
0,405	1,465	1,537
0,436	1,463	1,530
0,546	1,456	1,518
0,578	1,455	1,516
1,014	1,448	1,503
1,367	1,446	1,500
1,709	1,444	1,498
2,930	1,436	1,489
3,39	1,430	1,485

Калия-лития ниобат KaLiaNb^Ois

X, мкм	"o	
0,4500	2,4049	2,2512
0,4750	2,3751	2,2315
0,5000	2,3546	2,2144
0,5250	2,3349	2,2010
0,5324	2,3260	2,1975
0,5500	2,3156	2,1900
0,5750	2,3016	2,1801
0,6000	2,2899	2,1720
0,6250	2,2799	2,1645
0,6500	2,2711	2,1586
0,6750	2,2631	2,1529

«o — 1 = 3,708 >2/(>2 — 0,04601),

- 1 =3,349 - 0,03564).

а-Кварц a-SiO_2

	"o	
0,185	1,65751	1,68988
0,198	1,65087	1,66394
0,231	1,61395	1,62555

Продолжение табл. 34.2 Продолокение табл. 34.

X, мкм	"o	
0,340	1,56747	1,57737
0,394	1,55846	1,56805
0,434	1,55396	1,56339
0,508	1,54822	1,55746
0,5893	1,54424	1,55335
0,7680	1,53903	1,54794
0,8325	1,53773	1,54661
0,9914	1,53514	1,54392
1,1592	1,53283	1,54152
1,3070	1,53090	1,53951
1,3958	1,52977	1,53832
1,4792	1,52865	1,53716
1,5414	1,52781	1,53630
1,6815	1,52583	1,53422
1,7614	1,52468	1,53301
1,9457	1,52184	1,53004
2,0531	1,52005	**1,52823**
2,3000	1,51561	
2,6000	1,50986	
3,0000	1,49953	
3,5000	1,48451	
4,0000	1,46671	
4,2000	1,4569	
5,000	1,417	
6,4500	1,274	
7,000	1,167	

Кислота гиппуровая CjHgCO-NH (CH2CO2H)

X.мкм	«a		«г
0,350	1,55	**1,61**	1,78
0,589	1,5348	**1,5921**	1,7598
0,700	1,534	1,589	1,755

Кислота а-иодноватая а-НЮз

X, мкм	"zi=a = X	"р = г = Z	"г = 6 = У
0,450	1,8798	2,0184	2,0560
0,500	1,8621	1,9930	2,0192
0,5325	1,8547	1,9829	2,0103
0,550	1,8497	1,9787	**2,0049**
0,600	1,8409	1,96a5	**1,9922**
0,650	1,8352	1,9571	1,9812
0,700	1,8308	1,9505	1,9765
0,800	1,8250	1,9407	1,9672
0,850	1,8223	1,9378	1,9639
0,900	1,8206	1,9347	1,9595
0,950	1,8180	1,9318	1,9564
1,000	1,8147	1,9292	1,9537
1,065	1,8123	1,9275	1,9508
1,100	1,8116	1,9260	1,9484
1,200	1,8086	1,9230	1,9436

Продолжение табл. 33.

Кремния карбид SiC

л. мкм	«о		X, мкм	"о	
0,4880	2,6916	2,7423	0,5321	2,6689	2,7167
0,5017	2,6837	2,7337	0,6328	2,6351	2,6794
0,5145	2,6771	2,7261	1,0642	2,5830	2,6225

п 1 - \ = 5,5515 - (0,1625)2];

„ 2 _ 1 _ 5,7382 —(0,16897)2].

Лития галлат LiGaOs

1 -	N 1 c""	/	1	N Jі c"	/
0,4100	1,7702	1,804	1,4000	1,7095	1,7372
0,4500	1,757	1,7895	1,6000	1,707	1,735
0,5000	1,7466	1,7785	1,8000	1,7045	1,7325
0,5500	1,7395	1,7702	2,0000	1,7025	1,7303
0,6000	1,7343	1,7615	2,2000	1,7005	1,7268
0,7000	1,7268	1,7565	2,4000	1,6978	1,7242
0,8000	1,7218	1,7507	2,6000	1,6955	1,7225
0,9000	1,7185	1,7475	2,8000	1,6925	**1,720**
1,0000	1,716	1,7445			
1,2000	1,7122	1,7405			

Лития иодат $LiIO_3$

	«0		А, МКМ	«о	
0,4579	1,9186	1,7633	0,5145	1,9018	1,7506
0,4765	1,9124	1,7586	0,5321	1,8978	1,7475
0,4Р80	1,9089	1,7560	0,6328	1,8815	1,7351
0,4965	1,9065	1,7541	1,0642	1,8517	1,7168
0,5017	1,9051	1,7531			

-0,021865);

п ; - 1 = 1,91359 0,01940).

•Лития формиата моногидрат LiCHOg • HgO

мкм	"а=А'=й		"т=г=с
0,4579	1,3708	1,4901	1,5308
0,4765	1,3698		1,5286
0,4880	1,3692	1 ',4873	1,5272
0,4965	1,3688	1,4866	1,5264
0,5017	1,3686	1,4862	1,5258
0,5145	1,3680	1,4851	1,5245
0,5321	1,3675	1,4838	1,5229
0,6328	1,3645	1,4784	1,5163
1,0642	1,3593	1,4673	1,5035

« 2 - 1 = 0 , 8 4 1 5 / - (0,0953)-'=|: к| — 1 =

= 1 , 1 4 1 0 6 (0 , 1 1 8 3) 2] ; л^ - 1 == 1.2454X

XX2/|X2 —(0,12496)2J.

Продолжение табл. 33.20

Лития ниобат LiNbOj

	%	
0,42	2,4144	2,3638
0,45	2,3814	2,2765
0,50	2,3444	2,2446
0,55	2,3188	2,2241
0,60	2,3002	2,2083
0,70	2,2862	2,1964
0,80	2,2756	2,1874
0,90	2,2598	2,1741
1,00	2,2487	2,1647
1,20	2,2407	2,1580
1,40	2,2291	2,1481
1,60	2,2208	2,1410
1,80	2,2139	2,1351
2,00	2,2074	2,1297
2,20	2,2015	2,1244
2,40	2,1948	2,1187
2,60	2,1882	2,1138
2,80	2,1814	2,1080
3,00	2,1741	2,1020
3,20	2,1663	2,0955
3,40	2,1580	2,0886
3,60	2,1493	2,0814
3,80	2,1398	2,0735
4,00	2,1299	2,0652
4,20	2,1193	2,0564

2 $\frac{1,173\text{-}104\text{-}1,65\text{-}10\text{-}2\ 7^{\wedge}}{1\text{-}3,9130+\ x2\_(2,12.102+2,7\text{-}10\text{-}8\Gamma^{\wedge})2}$ '

-2,78- Ю-'^Х3; «2— 1 =3,55674-2,605-10-'•

$\frac{0,970\text{-}Ю\text{Н}\text{-}2,70\text{-}10\text{-}2}{X2—\ (2,01\text{-}102+5,4\text{-}10\text{-}®\ \Gamma2)2}$ — 2,24-10-8X2.

Лития сульфата моногидрат $Li_2SO_4 \cdot H_2O$

Л мкм	"а	"Р	т
0,3650	1,4771	1,4926	I,5029
0,4047	1,4722	1,4876	1,4980
0,4358	1,4693	1,4849	1,4951
0,4471	1,4686	1,4834	1,4941
0,4713	1,4670		1,4926
0,5016	1,4652	1,4802	1,4905
0,5461	1,4631	1,4782	
0,5780	1,4619	1,4772	i;4867
0,5876	1,4616	1,4766	1,4866
0,6678	1,4593	1,4743	1,4838
0,7016	1,4585		1,4831
1,014	1,4538	1,4678	1,4777
1,129	1,4525	1,4666	1,4761
1,367	1,4502	1,4636	1,4732
1,530	1,4485		1,4708
1,709	1,4466	1,4588	1,4676

Продолжение табл. 33.20

Лития танталат LiTaOs

X, мкм	"o	
0,45	2,2420	2,2468
0,50	2,2160	2,2205
0,60	2,1834	2,1878
0,70	2,1652	2,1696
0,80	2,1538	2,1578
0,90	2,1454	2,1493
1,00	2,1391	2,1432
1,20	2,1305	2,1341
1,40	2,1236	2,1273
1,60	2,1174	2,1213
1,80	2,1120	2,1170
2,00	2,1066	2,1115
2,20	2,1009	2,1053
2,40	2,0951	2,0993
2,60	2,0891	2,0936
2.80	2,0825	2,0871
3,00	2,0755	2,0799
3,20	2,0680	2,0727
3,40	2,0601	2,0649
3,60	2,0513	2,0561
3,80	2,0424	2,0473
4,00	2,0335	2.0377

Меди бромид CuBr

X, мкм	«		«
0,4358 0,4678 0,4800 0,5086 0,5461	2,336+0,002 2,229+0,002 2,207+0,002 2,171+0,002 2,141+0,002	0,5791 0,5896 0,6438 0,7699	2,122+0,002 2,117+0,002 2,096+0,002 2,069+0,004

Меди и'Одид Cul

X, мкм			«
0,4358 0,4678 0,4800 0,5086 0,5461	2,562+0,002 2,461 +0,002 2,448+0,002 2,411 +0,002 2,372+0,002	0,5791 0,5896 0,6438 0,7699	2,347+0,002 2,342+0,002 2,315+0,002 2,280+0,004

Меди хлсрид CuCl

X, мкм	«	X, мкм	«
0,4047 0,4078 0,4358 0,4678 0,4800	2,153+0,001 2,141+0,001 2,072+0,001 2,033+0,001 2,023+0,001	0,5086 0,5461 0,5791 0,5896 0,6438 0,7699	2,004+ 0,001 1,987+0,001 1,976+0,001 1,972+0,001 1,958+0,001 1,941+0,002

Продолжение табл. 33.20

Натрия бромат NaDrOs

n2 — 1 = 1,3194 — (0,09)2] + 0 , 2 3 5 7 - — {0,2)2] _O,0174

Натрга нитрит NaNOa

X, мкм	~a=a=X		
0,4358	1,3531	1,4212	1,690
0,4800	1,350	1,4166	1,675
0,5086	1,3484	1,4158	1,6685
0,5461	1,3470	1,4137	1,6620
0,5791	1,3458	1,4122	1,6567
0,5889	1,3455	1,4120	1,6555
0,6438	1,3442	1,4105	1,6510

Натрия хлорат КаСЮз

	«	X, мкм	«
0,2310	1,616	0,4862	1,522
0,2573	1,585	0,5173	1,519
0,2748	1,572	0,5892	1,515
0,3256	1,549	0,6563	1,513
0,3404	1,544	0,6867	1,512
0,3467	1,542	0,7188	1,511
0,3611	1,539		

— 1 = 1,1825 — (0,09)2] + 0,07992 - — (0,185)2] —0,00864X2.

Пиаргирит AggSbSs

« 2 - 1 = 6,585X2/[X2-(0,4)2] + ^f 0,1133X2/[X2—(15)2]; n f - 1 = 5,845 — — (0,4)2] + 0,0202 (15)2].

Пруетит AgsAsSs, 20° С

X. мкм	"o	
0,5876		2,7896
0,6328	3,0190	2,7391
0,6678	2,9804	2,7094
1,0140	2,8264	2,5901
1,1290	2,8067	2,5756
1,3670	2,7833	2,5570
1,530	2,7728	2,5485
1,709	2,7654	2,5423
2,50	2,7478	2,5282
3,56	2,7379	2,5213
4,62	2,7318	2,5178

n^ = 7,483 + 0,474/(X2 - 0,09) —0,0019X2;

n1 = 6,346 + 0,342/(X2 — 0,09) - 0,0011X2.

Продолжение табл.

Ртути сульфит **a-HgS**

	%	
0,62	2,9028	3,2560
0,65	2,8655	3,2064
0,68	2,8384	3,1703
0,70	2,8224	3,1489
0,80	2,7704	3,0743
0,90	2,7383	3,0340
1.00	2,7120	3,0050
1,20	2,6884	2,9680
1,40	2,6730	2,9475
1,60	2,6633	2,9344
1,80	2,6567	2,9258
2,00	2,6518	2,9194
2,20	2,6483	2,9146
2,40	2,6455	2,9108
2,60	2,6433	2,9079
2,80	2,6414	2,9052
3,00	2,6401	2,9036
3,20	2,6387	2,9017
3,40	2,6375	2,9001
3,60	2,6358	2,8987
3,80	2,6353	2,8971
4,00	2,6348	2,8963
5,00	2,6267	2,8863
6,00	2,6233	2',8799
7,00	2,6156	2,8741
8,00	2,6112	2,8674
9,00	2,6066	2,8608
10,00	2,6018	2,8522
11,00	2.5914	2,8434

Рубидия дигидрофосфат RDP

X, мкм	%	
0,4765	1,514	1,4861
0,4880	1,5132	1,4832
0,4965	1,5126	1,4827
0,5017	1,5121	1,4825
0,5145	1,5116	1,4820
0,5321	1,5106	1,4811
0,6328	1,4976	1,4775
1,0642	1,4926	1,4700

n1 — \ = \ ,2068 -0,01539);

«2—1 = 1,15123-0,010048).

Свинца ниобат ***PbNb40u***

X, мкм			
0,4579	2,4754	2,4766	2,5047
0,4765	2,4554	2,4571	2,4845
0,4880	2,4445	2,4465	2,4735
0,4965	2,4371	2,4392	2,466
0,5017	2,4329	2,435	2,4618

Продолжение табл. 34.2 ***Продолокение табл. 34.2***

	"a = a = X	"'l = Ь = F	"т = с = Z
и,5145	2,4231	2,4254	2,4518
0,5321	2,4113	2,4137	2,4396
0,6328	2,3644	2,3667	2.3922
1,0642	2,2979	2,301	2,3254

nl — 1 = 4,124 —(0,202)2]; n^ — l=

1,139 У? / - (0,2011)^] ; _ 1 _ 4,246 —

— (0,2014)2].

Свинца титанит PbTiOs

л, мкм	"o	
0,4880	2,793	2,7744
0,5017	2,7742	2,7574
0,5145	2,7586	2,7431
0,5321	2,7398	2,7260
0,6328	2,6676	2,6594
1,0642	2,5712	2,5692
1,152	2,5637	2,5623

n 2 - 1 = 5,359X2/[X2-(0,224)2];

«2 _ 1 = 5,365 — (0,2170)2].

Селен Se

л, мкм	"o	
1,06	2,790+0,008	3,608+0,008
1,15	2,737+0,008	3,573+0,008
3,39	2,650+0,01	3,460+0,01
10,60	2,64 +0,01	3,41 +0,01

Серебра тиогаллат AgGaSg. 20° C

	"o	
0,4916	2,700	2,710
0,5016	2,683	2,676
0,5461	2,619	2,585
0,5780	2,587	2,546
0,5876	2,579	2,537
0,6678	2,529	2,481

nl = 5,728 + 0,2410/(X2 — 0,0870) - 0,00210X2;

= 5,497 + 0,2026/(X2 — 0,1307) - 0,00233

Продолжение табл. 33.20

Теллур **Te**

Л, ыкм	«o	"e
4,0	6,372	4,929
5,0	6,316	4,864
6,0	6,286	4,838
7,0	6,270	4,821
8,0	6,257	4,809
9,0	6,253	4,802
10,0	6,246	4,796
12,0	6,237	4,789
14,0	6,230	4,785

Тербия молибдат **ТЬ (Мо04)з**

X. мкм	"a=b=Y	"p=a=X	"l=c=Z
0,4579	1,8864	1,8867	1,9433
0,4765	1,8797	1,8800	1,9358
0,4880	1,8760	1,8764	1,9316
0,4965	1,8734	1,8739	1,9288
0,5017	1,8720	1,8724	1,9271
0,5145	1,8687	1,8690	1,9232
0,5321	1,8645	1,8649	1,9185
0,6328	1,8476	1,8482	1,8993
1,0642	1,8222	1,8226	1,8704

n1 — \= 2,27241 — O,C

«2 _ 1 = 2,273955 - 0,02333);

n^ — 1 = 2,443016X2/(^2 — 0,025133).

d-TpeoHUH

X, мкм	"a=X		
0,4579	1,5299	1,6039	1,6125
0,4765	1,5282	1,6017	1,6100
0,4880	1,5272	1,6004	1,6087
0,4965	1,5266	1,5996	1,6077
0,5017	1,5263	1,5991	1,6072
0,5145	1,5254	1,5979	1,6059
0,5321	1,5243	1,5965	1,6043
0,6328	1,5196	1,5898	1,5974
1,0642	1,5114	1,5788	1,5855

n 1 — \ = [,273 X2/[X2 — (0,1032)2];

n^ — 1 = 1,477 X2/[X2 _ (0,1137)2];

«2 — 1 = 1,497 X2/[X2 — (0,1169)2].

Продолжение табл 33.20

Турмалин

X. мкм	"с 1	˜e
0,4765	1,6474	1,6273
0,4880	1,6465	1,6263
0,4965	1,6457	1,6255
0,5017	1,6454	1,6251
0,5145	1,6446	1,6248
0,5320	1,6433	1,6231
0,6328	1,6378	1,6183
1,0642	1,6274	1,6088

- 1 = 1,6346 X2/(X2 — 0,010734);

•1 = 1,57256 - 0,011346).

Уротропин (CH2)6N4

X, мкм	«	X, мкм	
0,4861	1,5984	0,5780	1,5899
0,5016	1,5953	0,5876	
0,5461	1,5917	0,6676	1!5856

Цинка окись **ZnO**

X.мкм	"o	
0,45	2,1058	2,1231
0,50	2,0511	2,0681
0,60	1,9985	**2,0147**
0,70	1,9735	**1,9897**
0,80	1,9597	1,9752
0,90	1,9493	1,9654
1,00	1,9435	1,9589
1,20	1,9354	1,9500
1,40	1,9298	1,9429
1,60	1,9257	1,9402
1,80	1,9226	1,9370
2,00	1,9197	1,9330
2,20	1,9173	1,9313
2,40	1,9152	1,9297
2,60	1,9128	1,9265
2,80	1,9100	1,9251
3,00	1,9075	1,9214
3,20	1,9049	1,9186
3,40	1,9022	1,9160
3,60	1,8994	1,9127
3,80	1,8964	1,9101
4,00	1,8891	1,9068

Продолжение табл. 33.1

Цинка селенид ZnSe

г., мкм		X. мкм	
0,589 1,0	2,61 2,48	1,5 2,0	2,45 2,44

,t2 _ 1 = 2,855 4-2,045 —0,109).

Цинка сульфид ZnS

X, мкм	"о		X, мкм	"о	
0,3600	2,705	2,709	0,5000	2,421	2,425
0,3750	2,637	2,640	0,5250	2,402	2,407
0,4000	2,560	2,564	0,5500	2,386	2,392
0,4100	2,539	2,544	0,5750	2,375	2,378
0,4200	2,522	2,525	0,6000	2,363	2,368
0,4250	2,511	2,514	0,6250	2,354	2,358
0,4300	2,502	2,505	0,6500	2,346	2,350
0,4400	2,486	2,488	0,6750	2,339	2,343
0,4500	2,473	2,477	0,7000	2,332	2,337
0,4600	2,459	2,463	0,8000	2,324	2,328
0,4700	2,448	2,453	0,9000	2,310	2,315
0,4750	2,445	2,449	1,000	2,301	2,303
0,4800	2,438	2,443	1,200	2,290	2,294
0,4900	2,428	2,433	1,400	2,285	2,288

Цинка теллурид ZnTe, 25" С

X, мкм	«	X, мкм	«
0,569	3,111	0,760	2,871
0,577	3,085	0,770	2,866
0,579	3,079	0,800	2,853
0,589	3,054	1,000	2,790
0,600	3,035	1,200	2,758
0,616	3,005	1,300	2,748
0,650	2,962	1,400	2,741
0,700	2,913	1,500	2,734
0,725	2 893	1,515	2,734
0,750	2,879	2,060	2,71

33.8. ВЫНУЖДЕННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА

В сильном световом поле в нелинейной среде может происходить взаимодействие оптических волн не только друг с другом, но и с акустическими и молекулярными колебаниями вещества. Интенсивная световая волна частоты ы, возбуждая в среде когерентные акустические или молекулярные колебания с частотой Q, одновременно дает рассеянную световую волну с частотой

$$\omega' = \omega +$$

Если возбуждаемые колебания акустические, то рассеяние называют ***вынужденным рассеянием Мандельштама — Бриллюэна*** (ВРМБ)и

$$aM\text{-}B = 2(D(t\text{»}33/c)\sin(e/2),$$

где ***Van к с*** — соответственно скорости звука и света в среде; 6 — угол, отсчитываемый от направления распространения световой волны (угол наблюдения). Наибольший сдвиг частоты происходит при рассеянии назад (е=п), при этом Йм-Б Гц (1 см-').

Если возбуждаются молекулярные колебания, то в зависимости от строения молекул вещества Q~100-=-1000 см-' и рассеяние называют ***вынужденным комбинационным рассеянием*** (ВКР).

В общем случае в ВКР может наблюдаться целый набор частот *'

$$\omega'=\omega \pm \qquad \pm / г й " \pm$$

где Q', Q" — характерные молекулярные колебания данного вещества, ***а т и п*** — целые числа.

Характерный сдвиг частоты Q при ВКР

Газы

Кислород	1552
Калия пары	2721
Метан	2916
Дейтерий	2991
Водород V	4155

Жидкости

Бромоформ	222
Тетрахлорэтилен	447
Четыреххлористый углерод	460
Этил иодистый	497
Гексафторбензол	515
Бромоформ	539
Трихлорэтилен	640
Сероуглерод	656
Хлороформ	667
орто-Ксилол	730
а-Диметилфенетиламин	836
Диоксан	836
Морфолин	841
Тиофенод	916
Нитрометан	927
Бензол дейтерированный	944
Кумол	990
1, 5-Дибромбензол	990
Бензол	992
Пиридин	992
Анилин	997
Стирол	998
жета-Толуидин	999
Бромбензол	1000
Хлорбензол	1001
Бензонитрил	1002
трет-Бутилбензол	1002
Этилбензол	1002
Толуол	1004
Фторбензол	1012
f-Пиколин	1016
жета-Крезол	1029
/-Фтор-2-хлорбензол	1030
Л(етй-Дихлорбензол	1030
Иодбензол	1070
Бензоил хлористый	1086
Бензальдегид	1086

' Для рассеяния Мандельштама — Бриллюэна аналогично I—co3:A;Q)n_ , где А — целое.

Продолжение

Q, СМ"»

Анизол 1097
Пиррол 1178
Фуран .1180
С™рол .1315
Нитробензол .1344
У-Бромнафталин .1368
;-Хлорнафталин .1368
2-Этилнафталин 1381
жгаа-Нитротолуол .1389
Хиполин .1427
Бромциклогексан .1438
Фуран 1522
Метиловый эфир салициловой кислоты .1612
Коричный альдегид .1624
Стирол .1629
3-Метилбутадиен 1638
Пентадиен .1655
Изопрен .1792
Гексин-/ 2116
оргао-Дихлорбензол .2202
Бензонитрил .2229
Ацетонитрил .2250
1, 2-Диметиланилин .2292
Метилциклогексан .2817
Метиловый спирт .2831
Ш1С-, транс-1, 5-Диметилциклогексан .2844
Тетрагидрофуран .2S49
Циклогексан .2852
цис-/, 2-Диметилциклогексан .2854
а-Диметилфенетиламин .2856
Диоксан .2856
Циклогексан .2863
Циклогексанон .2863
цис-, транс-1, 5-Диметилциклогексан .2870
цис-1, 4-Диметилциклогексан .2873
Циклогексан .2884
Хлористый метилен 2902
Морфолин .2902
2-Штан .2908
2, 3-Диметил-У, 5-гексадиен .2910
Лимонен .2910
оргао-Ксилол .2913
Гексин-У .2915
Чыс-2-Гептан .29ОД
Мезитилен .2920
2-Бромпропан .2920
Ацетон .2921
Этиловый спирт .2921
Карвон .2922
цис-i, 2-Диметилциклогексан 2927
Диметилформамид .2930
2-Хлор-2-Метилбутан .2931
2-Октан .2931
цис, транс-1, S-Диметилгексан .2931
жгаа-Ксилол .2933
1, 2-Диэтиловый эфир винной кислоты .2933
орто-Ксилол .2933
Пиперидин .2933
1, 2-Диэтилбензол .2934
2-Хлор-2-Метилбутен .2935
У-Бромпропан .2935
Пиперидин .2936
. . . . . *Щ*
Циклогексаион .2945
2-Нитропропан .2 9 ^
1, 2-Диэтилкарбонат .2955

Продолжение

Q, см-1

1, 2-Дихлорэтан .2956
тронс-Дихлорэтилен .2956
У-Бромпропан 2962
2-Хлор-2-Метипбутан .2962
а-Диметилфенетиламин .2967
Диоксан 2967
Циклогексаиол .2982
Циклопентан .2982
Циклопентаиол .2982
Бромциклопентан 2982
орто-Дихлорбензол .2982
п-Хлортолуол .2982
а-Пиколин .2982
п-Ксилол .2988
орто-Ксилол .2992
Дибутилфталат .2992
У, У, У-Трихлорэтан .3018
Хлоргидрин этилена .3022
Пзофорон .3022
Нитрозодиметиламин .3022
Пропилеигликоль .3022
Циклогексан .3038
Стирол .3056
Бензол .3064
гаре/и-Бутилбензол 3064
У-Фтх)р-2-Хлорбензол .3084
Живица .3090

Псевдокумол 3093
Уксусная кислота 3162
Ацетонилацетон .3162
Метилметакрилат .3162
7-ПИК0ЛШ1 .3182
Анилин .3300
Вода .3651

Твердые вещества

Кварц .128
Ниобат лития 152
а-Сера .216
Ниобат лития 248
Кварц .466
а-Сера 470
Ниобит лития .628

Вольфрамат кальция • 911
Стильбен 997
Полистирол .10Ш
Кальцит 084
Алмаз 332
Нафталин
Стнльбен .1591
Триглицинсульфат ^ ^
Триглицинсульфат .^ 0 2
Триглицинсульфат • - 3022
Полистирол •

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Про.хорова. М.: Советское радио, 1978.
2. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
3. Барьяхтар В. Г., Иванов Б. Д., Четкий М. В.// Успехи физ. наук. 1985. Т. 146, вып. 3. С. 425.

глава 34

ЛАЗЕРЫ

М. Е. Бродов, В. П. Яновский

34.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Лазеры, или ***оптические квантовые генераторы (ОКГ)*** — это устройства для генерации когерентного оптического излучения, основанные на использовании эффекта вынужденного излучения (термин «лазер» происходит от английского light amplification by stimulated emission of radiation, что означает усиление света с помощью вынужденного излучения).

При наличии инверсной населенности уровней энергии £2 и *El* активной среды ***(E2>Ei),*** т. е. при выполнении условия N2ig2>Nigi (N2, Nu g2, gi — населенности и кратности вырождения уровней £2, вынужденное излучение превалирует над поглощением и свет с резонансной частотой со=£2—£i/h усиливается при прохождении через среду. Усиленный таким образом свет люминесценции активной среды называют излучением сверхлюминесценции. Для возникновения генерации вводят положительную обратную связь, располагая активную среду в оптическом резонаторе, который в простейшем случае представляет собой два параллельных зеркала. Одно из зеркал резонатора делается полупрозрачным для частичного вывода излучения. Пространственное распределение поля генерируемого излучения соответствует собственным колебаниям резонатора, называемым модами. Различают продольные и поперечные моды, относящиеся к распределению поля вдоль оси резонатора и в плоскости, перпендикулярной оси. Искусственное снижение добротности резонатора позволяет достичь значительного коэффициента усиления активной среды без возникновения генерации. Последующее быстрое включение добротности приводит к генерации мощных световых импульсов малой длительности (гигантских импульсов).

Основными свойствами лазерного излучения, отличающими его от излучения других источников света, являются:

1) высокая когерентность (объем когерентности может превышать в Ю" раз объем когерентности световой волны той же интенсивности, получаемой от самых моноэнергетических нелазерных источников света);

2) возможность генерации импульсов предельно малой длительности (до т~1,6-10-"с);

3) высокая мощность излучения (до 10^ Вт) в импульсном режиме генерации.

Лазеры различаются:

1) по типу активной среды — ***газовые*** (атомные, ионные, молекулярные), ***твердотельные*** (на примесных кристаллах и стеклах, полупроводниковые, на центрах окраски), ***жидкостные:***

2) по режиму генерации — ***непрерывные, импульсные*** (в режиме свободной генерации, с модуляцией добротности).

Сведения о принципах и режимах работы лазеров можно найти, к примеру, в [1, 2, 3].

34.2. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В настоящее время инверсная населенность и генерация в газообразной среде получены более чем на 6000 переходов. Газовые лазеры работают в очень широком диапазоне длин волн — от вакуумного ультрафиолета до инфракрасной области спектра — как в импульсном, так и в непрерывном режиме.

Малая плотность и высокая однородность газообразной активной среды обусловливают высокую направленность и моноэнергетичиость лазерного излучения. Вместе с тем малая плотность газов не позволяет получить высокую плотность возбужденных частиц и такого удельного энергосъема, как в лазерах на основе конденсированных сред.

Методы создания инверсной населенности [4j. Специфика газов проявляется и в многообразии физических процессов, применяемых для создания инверсной населенности. К их числу относятся возбуждение при соударениях в электрическом разряде, химическое возбуждение, фотодиссоциация, газодинамические процессы, оптическая накачка, электронно-лучевое возбуждение.

В подавляющем большинстве газовых лазеров инверсия населенностей создается в электрическом разряде. При этом электроны разряда возбуждают газ, создавая инверсию населенностей уровней энергии ионов, нейтральных атомов, устойчивых и неустойчивых молекул. Газоразрядный метод применим для возбуждения лазеров как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Электрический разряд в газе бывает самостоятельным и несамостоятельным. Несамостоятельные разряды могут быть получены в газах высокого давления и больших объемах. Переход к несамостоятельным разрядам позволил резко поднять мощность и энергию излучения прежде всего таких лазеров с большим КПД, как СОз-лазеры.

Хорошо разработан метод создания несамостоятельного разряда с и а л пучка электронов высокой энергии. Элев е и применяются также, наряду с импульсными лампами, для инициации химических реакций. При химическом возбуждении инверсия населенностей создается в результате химических реакций, при которых образуются возбужденные атомы, радикалы, молекулы. К химическим можно отнести и лазеры, инверсия населенностей в которых достигается с помощью фотодиссоциации Как правило, это быстропротекающие реакции, инициируемые импульсной световой вспышкой

Газодинамический метод получения инверсии основан на возможности получения потоков газов с быстро изменяющимися термодинамическими параметрами. Тепловая энергия нагретого газа при быстром охлаждении, например при протекании со сверхзвуковой скоростью через сопло, непосредственно преобразуется в таких системах в энергию электромагнитного моноэнергетического излучения.

При электронно-лучевом возбуждении газовых сред происходит ионизация газа электронами высокой энергии (0,3—3 МэВ). При этом энергия быстрых электронов первичного пучка каскадным образом преобразуется в энергию большого числа медленных электронов. Возбуждение верхних лазерных уровней осуществляется именно этими электронами низкой энергии.

Оптическая накачка для газовых активных сред эффективна, если источник накачки достаточно моноэнергетичен, поскольку резонансные линии поглощения газов узки. Обычно используются лазерные источники накачки.

Для газов характерна передача энергии возбуждения от частиц одного сорта частицам другого сорта при неупругих столкновениях между ними. Такая передача тем более эффективна, чем более точно совпадают уровни энергии сталкивающихся частиц.

В табл. 34.1 представлены вещества, на которых

получено стимулированное излучение. В табл. 34.2 приведены длины волн генерации. Порядок расположения веществ соответствует табл. 34.1. Сильные линии помечены жирным шрифтом. Длины волн в вакууме и воздухе обозначены Явак и Явозд.

Для обозначения линий ионизованных атомов используются римские цифры, которые ставятся перед длиной волны перехода. Таким образом, II, III, IV обозначают одно-, двух-, трехкратноионизованный атом.

В табл. 34.2 используется стандартная система обозначений молекулярной спектроскопии. Колебательно-вращательная полоса — совокупность переходов из верхнего колебательного состояния (vu v^, ..., и„) верх на нижнее (ui, Dj, -, ^n^нижи, где vi, v^, ... t)„ — квантовые числа для ***n*** нормальных колебаний молекулы. Квантовые числа fi, Vi, Vs для трехатомной молекулы относятся соответственно к симметричному валентному, деформационному и асимметричному валентному колебаниям. Чисто вращательные переходы — переходы между уровнями одного и того же электронного и колебательного состояния, различающиеся вращательным квантовым числом.

Более подробно информацию о газовых лазерах можно найти в [1, 2, 5, 6].

Таблица 34.1. Активные среды газовых лазеров (последовательность расположения в гл. 34 справочника)

Нейтральные и ионизованные атомы

He Ne *AT* Kr Xe Fe Ni н Na K **Rb** Cs cu	Ag Au Be Mg Ca Sr Ba Zn Cd **g®** Al Ga	,,, Tl C Si Ge Sn **Pb** N P As Sb Bi	1 ° s Se Te F CI Br I Mn Sm Eu Tm Yb

Двухатомные молекулы

X€, АГ, ***It*** ArCl KrBr KrCl KrF XeBr XeCI	XeF XeO KrO HgBr HgCl H. **gfe** Na^ N2	Bi, S. Te^ F. Br, CI, ^IF HF DF	HCl DCl HBr DBr NO CN OH DD CO

Многоатомные молекулы

Xe^Cl XegBr KrjF O3 **S** **S,0**	**o c s** ***CS"*** HCN DCN HNC FCN CICN BrCN	ICN NH, FNO CINO BrNO **S 1**	HgS D S BFa BCl3 **NH3** N o a

	CH2Cl2	**CH3ClH**	C^H3C!
CFgBr	CH3P	**CH3NH,**	C2H3Bf
CF3I	**CH3CI**	CH.,CF2	C2H3CN
	CHgBr		
	CH3I		
H2C0	**CH3OH**	i i i f	i r
	CH3CN		н о т
	CH3Ke		FCN
CH^Pr		C2H5OH	

Таблица 34.2. Лазерные пеl)ехоцы в нейтральных и ионизованных атомах, в двухатомных и многоатомных молекулах

Активная среда He. ***Условия возбуждения; импульсный и непрерывный разряд в*** He ***при*** P = 30-^100 Па; ***импульсный разряд в смеси*** He(1,5—2кПа) ***и*** H. (400 Па)

0,706517	2,05813	8,53
0,706521	2,0603	95,763
1,8685	4,60535	**216,12**
1,9543	4,60567	

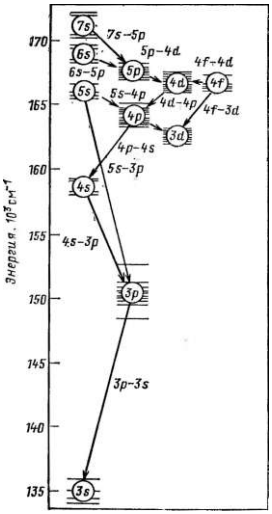


Рис. 34.1. Схема основных групп лазерных переходов в Ne [7]

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Ne [4] ***(рис. S4.1). Условия возбуждения: ионные переходы возбуждаются в импульсном разряде при плотности тока около*** 1 кА/см^ ***и*** P = 0,1 1 Па; ***большинство атомных переходов возбуждается в смеси*** Ne (1 — 10 Па) и He (70 Па); ***многие переходы возбуждаются в чистом*** Ne

	^возд» мкм		
IV	0,2018424	1,2460	3,5835
IV	0,2022186	1,2689	3,6515
IV	0,2065304	1,2887	3,7736
III	0,2177705	1,2912	3,9806
III	0,2180858	1,4276	4,2171
V	0,22657	1,4304	5,1696
IV	0,2285793	1,4321	5,3243
IV	0,2357980	1,4330	5,3249
IV	0,2373200	1,4346	5,4033
III	0,2473398	1,4368	5,405
III	0,2609982	1,484450	5,6652
III	0,26134	1,486926	5,7053
III	0,2677918	1,487247	5,7758
III	0,26786901	1,488759	5,8844
III	0,2777634	1,489954	5,9563
III	0,2866726	1,493623	6,7769
11	0,3319745	1,5231	6,8865
II	0,3323745	1,7162	6,9857
II	0,332717	1,8210	7,3208
II	0,332923	1,8253	7,4201
III	0,333114	1,8276	7,4217
II	0,3345446	1,8304	7,4679
II	0,3378256	1,8403	7,4779
II	0,3392799	1,8591	7,4973
II	0,339320	1,8597	7,5292
II	0,348195	1,9574	7,5674
II	0,371309	1,9577	7,5850
	0,54006	2,0350	7,6142
	0,58525	2,0353	7,6440
	0,59448	2,1041	7,6489
	0,59393	2,1708	7,6904
	0,60461	2,3260	7,6994
	0,61180	2,37	7,7389
	0,61431	2,3951	7,7634
	0,63282	2,4219	7,7794
	0,63518	2,4250	7,8347
	0,64011	2,5393	7,8693
	0,73048	2,5524	7,9406
	0,84634	2,7574	7,9824
	0,86353	2,7819	8,0066
	0,87717	2,9448	8,0599
	0,88653	2,9668	8,1712
	0,89886	2,9805	8,3347
	0,92874	3,0260	8,3472
	1,0295	3,0268	8,8388
	1,0621	3,3173	8,8528
	1,0798	3,391	9,0871
	1,0844	3,3333	10,060
	1,11441	3,3353	10,978
	1,1177	3,3500	11,857
	1,1390	3,3510	11,898
	1,1409	3,3804	12,831
	1,15235	3,3840	13,736
	1,15259014	3,3903	13,756
	1,1601	3,3913	16,634
	1,1614	3,4471	16,664
	1,17673	3,4489	16,889
	1,1789	3,475	16,943
	1,1985	4,4789	17,153
	1.2066		

Продолокение табл. 34.2

17,184	32,507	55,51
17,800	33,815	57,34
17,837	33,828	68,31
17,884	34,543	72,08
18,392	34,670	85,01
20,474	35,592	86,93
21,746	37,221	88,47
22,830	41,730	89,82
25,416	50,69	106,0
28,045	52,40	124,6
31,544	53,47	126,1
31,919	54,00	132,8
32,007	54,10	

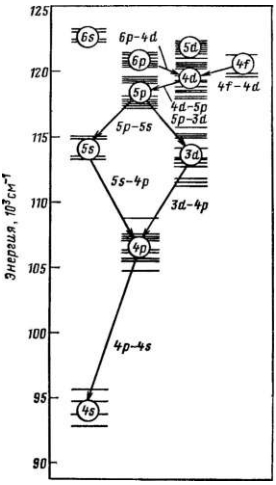


Рис. 34.2. Схема основных^ групп лазерных переходов

Продолжение табл. 34.2

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Ar (рис. 34.2). ***Условия возбуждения: почти все переходы возбуждаются в непрерывном режиме; плотность тока для ионизованного*** Ar 30—150 А/см^ ***при давлении*** 1—80 Па; ***для возбуждения переходов в ультрафиолетовой области спектра*** (X < 0,33 мкм) ***необходима более высокая плотность тока; сильные линии*** X = 0,351 ***и*** 0,364 мкм ***могут быть возбуждены в непрерывном режиме; переходы в инфракрасной области спектра*** (л > 1,6 мкм) ***возбуждаются в слабом непрерывном разряде при давлении около*** 7 Па

,эд, мкм		
0,183730	0,514532	**2,862**
0,183733	0,528690	2,8776
0,2113982	0,550220	2.8836
0,2248840	0,64831	2,9273
0,2513298	0,6730	2,9788
0,2621377	0,68613	3,0454
0,2624882	0,7503	3,0988
0,2753884	0,877186	3,1325
0,2884216	0,912297	3,1338
0,2855374	0,965778	3,6312
0,2912924	1,0470	3,70138
0,2926227	1,092344	3,708
0,3002642	1,1448	3,71439
0,302405		4,2033
0,305484	1,24028	4,7138
0,333613	1,27022	4,9148
0,334472	1,40948	4,9199
0,335849	1,5046	4,9496
0,351112	1,6180	5,02338
0,351418	1,619395	5,1203
0,357661	1,652	5,1205
0,363789	1,6941	5,3897
0,37052	1,791437	5,4666
0,379532	2,0616	5,4680
0,385829	2,0986	5,8022
0,414671	2,1332	5,8461
0,418298	2,1534	6,0515
0,437075	2,2038	6,7443
0,448181	2,2077	6,9410
0,454505	2,31339	6,9429
0,457935	2,3966	7,2147
0,466956	2,5008	7,7982
0,465789	2,5487	7,8002
0,472686	2,5504	7,8042
O,'	2,5627	12,138
O,'	2,5661	12, 188
0,488903	2,6542	15,032
0,496507	2,6836	15,037
0,49928	2,71529	26,937
0,501716	2,7357	26,956
0,506204	2,8195	
0,514179	2,8238	

Активная среда Kr. ***Условия возбуждения: почти все линии в криптоне можно возбудить в непрерывном режиме; для ионизованного криптона необходима плотность тока*** 50—200 А/см^ ***или*** 7—10 кА/см^ ***(вакуумный ультрафиолет); давление*** 1—30 Па

	^ВС>зд. мкм				
IV	0,175641	II	0,512573		1,9211
V	0,183243	II	0,529831		2,04240
IV	0,195027	II	0,539865		2,1165
IV	0,196808	II	0,568188		2,19020
IV	0,2051082	II	0,575298		2,2475
IV	0,2191916	III	0,603717		2,4260
IV	0,2254638	11	0,60381		2,52342
IV	0,2338478	II	0,616880		2,6260
IV	0,2417843	III	0,631022		2,6281
IV	0,2649357	II	0,631276		2,86134
IV	0,2664398	II	0,641661		2,8656
IV	0,2741380	11	0,647088		2,9836
III	0,3049704	II	0,65100		2,9870
III	0,3124363	II	0,657012		3,0664
III	0,3239512	II	0,66029	1	3,0528
III	0,337496	II	0,676442		3,1508
III	0,3507420	II	0,687084		3,3401
III	0,356423	II	0,7435764		3,3411
III	0,406737		0,752546		3,4873
III	0,413133		0,7603		3,4885
III	0,415444	II	0,79314		3,774
III	0,417179	II	0,799322		3,956
III	0,422658		0,810433		3,9573
II	0,431781	II	0,828037		4,068
II	0,438654	II	0,85878		4,142
III	0,444329	II	0,86901		4,3736
II	0,457720		0,88058		4,3755
II	0,458285		0,8929		4,8760
II	0,461528		1,14582		4,8819
II	0,461915		1,31775		4,9983
II	0,463386		1,36225		4,9999
II	0,465016		1,44269		5,1298
II	0,468041		1,47648		5,2985
II	0,469444		1,4966		5,3004
II	0,476243		1,5330		5,5685
II	0,476573		1,68533		5,5848
II	0,482517		1,68965		5,6290
11	0,484659		1,6936		7,0565
III	0,501645		1,7843		7,3605
II	0,50224©		1,8185		

Активная среди Xe. ***Условия возбуждения: многие линии ионизованного*** Xe ***можно возбудить в непрерывном режиме; плотность тока*** 70—200 А/см^; ***при импульсном возбуждении многие линии в видимой области спектра генерируются одновременно: типичное давление*** (1-10)-10"* Па; ***в атомарном*** Xe ***все линии длиннее*** 2,03 мкм ***можно возбудить в непрерывном режиме***

IV	0,2232442	IV	0,3330869	IV	0,380322
IV	0,2315357	IV	0,334974	IV	0,397302
III	0,247718	111	0,3454248	III	0,405005
IV	0,2526664	IV	0,348322	III	0,406048
III	0,2691939	III	0,359661	III	0,421401
IV	0,29837	IV	0,3645478	HI	0,424024
III	0,3079738	III	0,366921	III	0,427259
IV	0,3246922	III	0,374571	III	0,428588
IV	0,3305957	IV	0,375979	IV	0,430577
III	0,330599	III	0,3780990	,,	0,441314

Продолжение табл. 34.2 ***Продолокение табл. 34.2***

III	0,443415	II 0,597111	2,6665
IV	0,455862	II 0,609361	2,8590
II	0,460303	III 0,61766	3,1069
IV	0,464759	III 0,623824	3,2739
IV	0,465073	II 0,627081	3,3085
III	0,467368	IV 0,62865	3,3666
III	0,468354	III 0,63435	3,4014
III	0,472357	III 0,63435	3,4335
III	0,474895	II 0,652865	3,5070
II	0,486249	II 0,66943	3,6210
III	0,486946	IV 0,669950	3,6509
II	0,488730	II 0,70723	3,6788
IV	0,495414	III 0,714894	3,6849
IV	0,496508	II 0,76186	3,8666
IV	0,500772	II 0,782763	3,8940
II	0,504492	II 0,798800	3,9955
IV	0,515703	II 0,823162	4,0196
IV	0,515905	II 0,833270	4,1516
III	0,523893	II 0,840919	4,5381
IV	0,525637	III 0,85716	4,5665
II	0,525992	II 0,858251	4,5694
IV	0,526015	II 0,871617	4,6097
II	0,526042	0,904539	5,0230
II	0,526195	J J 0,905930	5,02441
II	0,531387	II 0,926539	5,3551
IV	0,534131	II 0,928854	5,4735
IV	0,534331	II 0,969859	5,5739
IV	0,535297	0,979970	5,6019
IV	0,539461	II 1,063385	6,3103
II	0,539525	II 1,	6,3137
III	0,540104		7,3147
II	0,541915	1,60519	7,4294
IV	0,549933	1,73254	9,0040
III	0,552442	2,02623	9,7002
IV	0,55923	2,3193	11,289
II	0,565938	2,4825	11,296
II	0,57291	2,51528	12,263
11	0,575103	2,6269	12,913
II	0,589330	2,65146	18,500
[V	0,595565	2,6601	75,578

Активная среда Fe. ***Условия возбуждения: импульсный разряд при диссоциации*** Pe(CO)6; ***импульсное возбуждение паров*** Fe с Ne, ***а также фотодиссоциация*** Fe(CO)5 ***излучением Кт^-лазера***

0,360	0,4529	0,563
0,385	0,540	6,8470
0,395	0,558	8,4902

Активная среда N1. ***Условия возбуждения: импульсный разряд при диссоциации Ni(CO)4***

II	0,79624	1,3968
II	0,79754	1,4550

Активная среда H. ***Условия возбуждения: импул1 разряд*** б На при Р = 1,3 Па ы Не ***при*** 470 Па

>ВОЗД, мкм

0,4340
0,4861
1,8751

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Na. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в смет паров*** Na ***при*** Р = 0,13-;-0,4 Па г^ Не ***при*** Р = 0.13-^-1,3 кПа: ***фотодиссоциаиия галогенидов натрия***

>'возд, мкм

0,5866	1,1382
0,5890	1,1404

Активная среда К. Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров К ***при*** Р = 13 Па ы Нг ***при Р*** = 400 ч- 700 Па: ***фотодиссоциация паров*** Ка ***излучением рубинового лазера***

,озд, мкм

0,4045	1,2523	6,4
0,7665	2,72	7,9
0,7699	3,140	12,5
1,17	3.15	15,95
1,2434	3.16	

Активная среда Rb. ***Условия возбуокдения: фотодиссоциация паров Rbg излучение.м рубинового лазера-, оптическая накачка лазерами на красителях***

мкм

0,4210	1,37	2,293
0,7619	1,48	2,79
0,7758	1,53	49,68
0,7800	2,254	50,93
0,7945		

Активная среда Cs. ***Условия накачки: оптическая накачка паров Csa излучением линии*** Не с X = 0,3880 мкм. ***Фотодиссоциация паров Csg излучением ультрафиолетовых лазеров***

0,4555	,01	2,95	3,489
0,8521	,360	3,010	3,613
0,8764	,376	3,095	4,22
0,8943	,47	3,2040	7,1871

-хл'осзпр^ро

-3d'''Cs)H4

Рис. 34.3. Схема лазерных переходов с длинами волн 0,5105 и 0,5782 мкм в парах Си [7]

Активная среда Си (рис. 34.3). ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** Си ***и*** Не

^возд. мкм					
II	0,27032		0,5700	II	О,?---.
11	0,24858		0,578213	II	0,8096
II	0,25063	II	0,72558	II	0,819228
II	0,25905	II	0,73999	II	0,8277
и	0,25988	II	0,740434	II	0,828321
II	0,450600	И	0,74382	II	0,851104
II	0,455592	II	0,766470	II	1,7438
II	0,467356	II	0,773868	II	1,7708
II	0,468199	II	0,777874	II	1,8004
II	0,485497	II	0,780519		1,8196
II	0,490973	И	0,780766		1,8228
II	0,493165	II	0,782566	II	1,8448
II	0,501261	II	0,784503	II	1,9154
II	0,502129	II	0,789583	II	1,9328
II	0,505178	II	0,794442	II	1,9479
II	0,506064	II	0,790257	II	1,9712
	0,510554	II	0,798817	II	**2,0006**

Активная среда kg. Условия возбуждения: непрерывный разряд с серебряным полым катодом и с Не или Ne ***в качестве буферного газа***

Хвозд. мкм					
II	0,22434	1	0,83795	II	1,7674
II	0,22774		0,84032		1,8380
II	0,31807	II	0,87476	11	1,8408
II	0,40859	II	0,8772	II	1,8463
II	0,47884	II	1,3759	II	1,8725
II	0,50273	II	1,5982	II	1,8795
II	0,64027	II	1,6462	II	1,8979
II	0,80054	II	1,6656		1,9370
II	0,82547	II	1,7203	II	1,9714
II	0,8263	II	1,7345		1,9823
II	0,83244	II	1,7478		2,0796

Активная среда Аи. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** Аи ***с*** Не; ***непрерывный разряд с полым золотым катодом и*** Не ***в качестве буферного газа***

	0,2428	II	0,29182	[I	0,69403
11	0,25337	II	0,29594	[I	0,75558
II	0,26165		0,3122	II	0,75929
	0,2676	II	0,55163	II	0,76005
II	0,28225	II	0,55221	II	0,76067
II	0,28470	II	0,62123	II	**0,76351**
II	0,28633		0,627818	II	**0,82729**
II	0,28882	II	0,67014	II	0,88676
II	0,28933	И	0,69029		

Активная среда Be. ***Условия возбуждения: импульсное возбуждение паров*** Be ***с*** Не ***или*** Ne в ***качестве буферного газа***

Хвозд. мкм
0,4675
0,5272
1,2096

Активная среда Mg. ***Условия возбуждения: импульсный и непрерывный разряды в парах*** Mg с He, Ne ***иш*** Ar

^ВОЗД. мкм					
0,9218			II	2,40415	3,86573
0,9244			II	2,41245	4,20018
1,0952				3,67794	4,36269
1,0915				3,68154	

Активная среда Ca. ***Условия возбуждения: импульсный в смеси паров*** Ca ***и*** He; ***оптическая накачка паров*** Ca ***ультрафиолетовым излучением: разряд с полым катодом***

^возд> мкм		
0,535	0,6162	О,!
0,586	0,644981	
0,6102	0,6717	5,5457
0,6122	II 0,854209	

Активная среда Sr. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** Sr ***с*** He; ***разряд С полым катодом***

Хвозд, мкм		
0,638075		3,0111
II 1,033014		6,4567
II 1,091797		

Активная среда Ba. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** Ba ***с*** He, Ne, Ar ***или*** Hj; ***разряд с полым катодом***

0,614172	2,4758	4,6706
0,649690	2,5515	4,7156
0,712033	2,5924	4,7171
1,1303	2,9057	5,0309
1,5000	2,9227	5,4798
1,82	3,9578	5,5636
1,9017	4,0069	5,8899
2,1568	4,33	6,4546
2,3254		

Активная среда Zn. ***Условия возбуждения: импульсный или непрерывный разряд в парах*** Zn ***с*** He, Ne ***или*** Ar; ***непрерывный разряд с полым цинковым катодом; диссоциация в импульсном разряде Zn(CH3)2***

X возд, мкм		
II 0,49116	II 0,610253	II 0,77325
II 0,492404	II 0,747879	II 0,775786
II 0,58944	II 0,758848	II 1,8308
II 0,6021	II 0,761290	II 5,0848

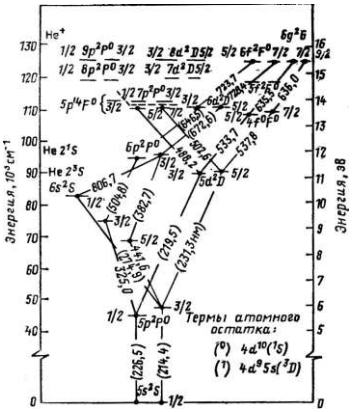


Рис. 34.4. Схема энергетических уровней и лазерных переходов в Cd **И** [5]. В скобках указаны Я, для которых наблюдались только спонтанные переходы

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Cd (рис. 34.4). ***Условия возбуждения: импульсный или непрерывный разряд в парах*** Cd ***с*** He ***или*** Ne; ***непрерывный разряд с полым катодом из*** Cd; ***импульсное возбуждение при диссоциации Cd(CH3)2***

озд J мкм

11	и,3250	l_1	п 0,63601	1,43
II	0,441563		II 0,72369	1,45
п	0,48820		II 0,78443	1,64
II	0,50259		II 0,80669	3,2882
II	0,533749		II 0,85300	13,185
11	0,537804		0,88778	14,578
II	0,63548	l	1,4	

Активная среда Hg. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров*** Hg (0,13 Па) « He (130 Па); ***разряд с полым катодом; импульсное возбуждение при диссоциации Hg(CH3)2***

0,365	II 0,8622		1,5295
III 0,479701	II 0,8677	II	1,5555
III 0,5210	II 0,93968		1,6920
0,5461	11 1,0583		1,6942
II 0,56773	1,11768		1,7073
II 0,61499	1,2222		1,71099
III 0,65015	1,2246		1,7329
II 0,7065	1,2545		1,8130
II 0,73466	1,2760		3,93
II 0,74181	1,2981		5,88
II 0,79447	1,3655		5,9817
II 0,85498	1,3675		6,49

Продолжент табл. 34.2

Активная среда **B.** ***Условия возбуждения: импульсный разряд в*** **BCl3** ***при P = 70*** Па

Хвозд. мкм

II 0,345134

Активная среда A1. ***Условия возбуждения: электрический разряд с полым катодом: буферный газ*** He ***ит*** Ne

II	0,358744	II	0,705656
II	0,691996	И	0,747137
II	0,704206		

Активная среда Ga. Условия возбуждения: импульсное буюодение при диссоциации Oa(CH3)3; фотодиссоциация Ga l

Хвозд, мкм

0,4172	5,7534
1,7363	

Активная среда In. ***Условия возбуждения: импильсный разряд в парах*** In с He ***или*** Ne, ***импульсное возЬуююиение при диссоциации*** In**(CH3)3**

^возд: мкм

0,4511	II	1,8732
0,468082		2,3779

Активная среда Tl. ***Условия возбуждения: короткий разряд в*** T1 (13 Па) с Ne ***или*** He: ***импульсное возбуждение при диссоциации T!(CH3)3: разряд с полым катодом***

^возд. мк

0,5152	0,6950	5,1059
0,53503	3,8125	10,449
0,5949		

Активная среда C. ***Условия возбуждения: линии ионизованного*** C ***возбуждаются при импульсном разряде в CO^ или воздухе; атомарные линии возбуждаются при непрерывном разряде в*** CO ***или CO^*** (1.3 Па) ***и*** He ***или*** Ne (250 Па)

>^возд. мк^

0,15482	0,51457	2,0645
0,15508	0,65780	3,4046
0,464745	0,67838	3,5155
0,465016	1,0691	5,5956
0,49541	1,4540	

Активная среда Si. ***Условия возбуждения: линии ионизованного*** Si ***при импульсном разряде*** PFe: ***пары*** Si ***при взаимодействии со стенками разрядной полости; атомарные линии при импульсном разряде*** SiCU

0,455259	0,667193
0,456784	1,1984
0,634724	1,2034
0,637148	1,5883

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Ge. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** Ge ***с*** He ***или*** Ne; ***диссоциация*** GeCIi ***в импульсном разряде***

Лвозд. мкм	
0,513175	1,9809
0,517865	**2,0200**

Активная среда Sn. ***Условия возбуюодения: импульсный разряд в парах*** Sn с Ne ***или*** He; ***непрерыоное возбуждение смеси*** He ***или*** Ne ***с*** Sn ***при*** P = 0,2Па

0,5589	0,684405	1,062
0,579918	0,6579	1,074
0,645350	1,061	4,6146

Активная среда PЬ. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** PЬ ***с*** He, Ne ***или к;; диссоциация PЬ(CH4)4 в импульсном разряде***

0,5	0,72291
0,405779	3,1738
0,4062	7,1740
0,53721	7,9399

Активная среда N. ***Условия возбуждения: для ионизованного*** N — ***импульсный разряд в воздухе,*** Ng ***или*** NH3 ***при*** P = 1,3 -h 13 Па; ***атомарные линии при импульсном*** - No ***или смеси*** N, ***с*** He

	Хвозд, мкм		
III	0,336734	II 0,566663	1,0568
IV	0,347867	II 0,567601	1,0611
IV	0,348296	0,567956	1,0623
II	0,399501	0,8594	1,34295
III	0,409732	0,87284	1,35818
III	0,410338	0,90455	1,45423
III	0,451088	0,93862	3,7942
III	0,451487	0,93921	**3,8154**
II	0,463055		

Активная среда P. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в*** PFB ***при P = 5*** Па; ***импульсный разряд в парах P при P =*** 0,3 30 Па с He ***или*** Ne ***в качестве буферного газа***

0,334769	0,616577	1,154
0,442208	0,667193	1,178
0,602421	0,784563	1,571
0,603421	1,008	1,648
0,604325	1,116	1,894
0,€	1,119	**2,060**

Продолжение табл. 34.2

Активная среда As. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** As ***и*** Ne (13 Па); ***непрерывный в смеси*** As ы He с ***полым катодом; диссоциация*** AsC^ ***при импульсном разряде***

	мкм		
И	0,538520	1,045	1,463
и	0,549695	1,061	1,8049
II	0,549773	1,124	1,807
II	0,555809	1,4255	1,9750
II	0,56516	1,1519	2,0277
II	0,583790	1,152	2,4460
и	0,617027	1,1521	2,9805
II	0,651174	1,294	5,2865
II	0,710272	1,412	

Активная среда Sb. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** Sb (0,3 Па) ***и*** Ne (30 Па); ***диссоциация Sb(CH3)g в импульсном разряде***

Хвозд, мкм
0,61299
12,033

Активная среда Bi. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** Bi с He ***или в*** B{(CH3):1 с He

П1	0,456084	0,571921	0,80689
	0,4722	0,75990	5,3284

Активная среда V. ***Условия возбуждения: диссоциация VCI4 в импульсном разряде***

2,0195
2,4473

Активная среда O. ***Условия возбуждения: все линии ионизованного O в импульсном разряде при P=0,13—13*** Па ***и плотности тока*** 500—2000 А/см^; ***почти все линии атомарного*** O ***наблюдаются в непрерывном режиж в газовой смеси O^ с*** Ar ***или*** O2 с Ne

	53Д, МКМ		
V	0,2640	II	0,434738	0,844672
V	0,278139	II	0,435128	0,844680
HI	0,298378	II	0,441488	2,652
III	0,304713	II	0,441697	2,89
IV	0,306345	II	0,460552	4,5607
IV	0,338128	II	0,464914	4,5632
IV	0,338133	III	0,559237	5,981
IV	0,338554	II	0,66402	6,8161
II	0,374949		0,672136	6,858
III	0,375426		0,844628	6,8731
III	0,375467		0,844638	**10,400**
III	0,375988			

Продолжение табл. 34.2

Активная среда S. *Условия возбуждения: все линии ионизованной* S *в импульсном юсокотстом разряде в* SO2, SFj *или* H2S *при* P = 1,3 -f- 7 Па: *линии атомарного* S *в импульсном или непрерывном разряде в парах* S *с* Ne

	K озд. мкм				
III	0,2638964	II	0,532088	II	0,581935
III	0,3324859	II	0,534583		0,7725
III	0,3497332	II	0,542874		1,0455
m	0,3709354	II	0,543287		1,0636
II	0,492560	II	0,545388		1,402
II	0,50116	II	0,547374		1,5422
II	0,501424	II	0,556511		1,6543
II	0,503262	II	0,550990		2,4363
II	0,516032	II	0,564012		2,7799
и	0.521962	II	0,564716		3,3892

Активная среда Se. *Условия возбуокдения: все линии возбуждаются в непрерывном режиме; плотность тока* 1,5—15 А/см2; *газовая смесь* Se(0,7 Па) i He(0,8-1,1 кПа)

	•озл, мкм				
II	0,446760	II	0,522751	II	0,644425
II	0,460434	II	0,525307	II	0,649048
II	0,461877	II	0,525363	II	0,653995
II	0,464844	И	0,527111	II	0,706389
II	0,471823	II	0,530535	II	0,739199
II	0,474097	II	0,552242	II	0,767482
II	0,476365	II	0,556693	II	0,772404
II	0,476552	II	0,559116		0,777
II	0,484063	II	0,562313	II	0,779615
II	0,484496	II	0,569788	II	0,783881
II	0,489	II	0,574762	И	0,830952
II	0,497566	II	0,584268	II	0,92493
II	0,499275	II	0,586627	II	0,995515
II	0,506865	11	0,605596	И	1,040881
II	0,509650	n	0,606583	II	1,258678
II	0,514214	II	0,610196		6,3672
II	0,517598				

Активная среда Te. *Условия возбуждения: импульсный или непрерывный разряд в парах* Te; *диссоциация в импульсном разряде Te(CH3)2*

	>'возд, мкм				
II	0,48429	II	0,57563	II	0,08851
II	0,50204	II	0,58511	II	0,70391
II	0,52564	II	0,59361	II	0,78017
II	0,54498	II	0,59726	II	0,79217
II	0,54540	II	0,59747	II	0,86046
II	0,54791	III	0,60145	II	0,87338
11	0,55702	II	0,60823	II	0,89721
II	0,55764	II	0,62307	II	0,88982
II	0,56405	II	0,62454	II	0,93779
II	0,56662	II	0,63497		3,1720
II	0,57081	II	0,65851		6,7595
II	0,57416	II	0,66486		7,7856
II	0,57559	II	0,66761		

Продолжение табл. 84.2

Активная среда F. *Условия возбуждения: импульсный разряд в р2 при P = 3 Па или в смеси* **CF4, SFo, QFe, NF3** с He o 2 o.

K мкм		
0,275958	0,696635	0,74257
0,282612	0,70394	0,74827
0,3121501	0,703745	0,748914
0,317413	0,712788	0,75150
0,320276	0,71298	0,7552235
0,402472	0,720237	0,775470
0,6239651	0,72043	0,780022
0,6348508	0,7310102	1,5900
0,6413651	0,7398688	

Активная среда Cl. *Условия возбуждения: ультрафиолетовые линии ионизованного* Cl *генерируют только в импульсном режиме при* P = 0,3 Па; *линии видимого диапазона возбукдаются непрерывно при P* = 7 Па; *линии атомарного* Cl *возбуждаются в* HCl *или в смеси* Cl3 *и* He

	ЗСВЗД мкм				
III	0,2632686	11	II	0,413250	II	0,522136
III	0,3191424		II	0,474042	II	0,539216
III	0,3392861		II	0,476871	II	0,609473
III	0,3393444		II	0,478134		**0,9451**
III	0,3530016		II	0,489685		**1,3859**
III	0,3560632		II	0,490483		1,3891
III	0,360210		II	0,491781		1,9755
III	0,361283		II	0,507829		2,0199
III	0,362268		II	0,510310		2,4466
III	0,3720436		И	0.512776		**3,0664**
III	0,3748770					

Активная среда Br. *Условия возбуждения: непрерывный разряд в* HBr; *импульсный разряд в* Bra *при P = Ъ* Па

>^возд, мкм		
0,2362465	0,518238	2,2854
0,2581246	0,523826	2,3511
0,2787619	0,533203	2,714
0,474266	0,611756	2,8375
0,505463	0,616878	

Активная среда I. *Условия возбуокдения: импульсный разряд в* \ *при P = 12, Па и в Ш при P = 250—500* Па; *импульсный или непрерывный разряд в* HI *или в смеси* l *и* He

	Хвозд, мкм				
И	0,448855	И	0,658521		1,06
II	0,453379	И	0,606893		1,315
II	0,467440	II	0,620486		1,4542
II	0,467553	II	0,662235		1,553
II	0,493467	II	0,682523		2,5986
II	0,498692	11	0,690477		2,7572
II	0,521408	II	0,703299		3,0360
II	0,521627	II	0,713897		3,2363
II	0,540736	II	0,761850		3,4290
II	0,5419	II	0,773578		4,331
II	0,559312	II	0,817001		4,858
II	0,562569	II	0,825381		4,8619
II	0,567808	II	0,880428		5,4972
II	0,576072	II	0,887761		6,7198
II	0,612749		0,58		**6,902**
II	0,633997		1,01		**9,326**
11	0,651618		1,03		

Продолокение табл. 34.2

Активная среда Мп. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в парах*** Мп ***и*** He

0,534106	0,553776	1,36267
0,542036	1,28998	1,38642
0,547064	1,32938	1,39975
0,551677	1,33190	II

Активная среда Sm. ***Условия возбуокдения: импульсный разряд в парах*** Sni с He, Ne ***или*** Ar

>-возд. мкм

1,912	1	2,6998	(1	3,4654	|| 4,1368
2,0482	||	2,9663	|	3,5361	| 4,8656

Активная среда Ей. ***Условия возбуокдения: импульсный разряд в парах*** Ей с He, Ne ***или*** Ar

^Бозд. мкм

0,6645	1,66	5,0647
0,9898	1,7596	5,2811
1,002	2,5811	5,4292
1,016	2,7174	5,7706
1,361	4,3202	5,9479
1,477	4,6935	6,0576

Активная среда Tm. V ***Условия возбуждения: импульсный разряд " парах*** Tm с"Hf, Ne ***или*** Ar

Лвозд. мкм

1,304	1,500	1,973
1,310058	1,637914	1,994160
1,338008	1,675404	2,107
1,433973	1,7319	2,384515
1,448509	1,958443	

Активная среда Yb. ***Условия возбуокдения: импульсный разряд парах*** Yb с He, Ne ***или*** Ar

Хвозд, мкм

II	1,6498	2,0036
	1,7454	2,1181
	1,7977	2,1480
II	1,8057	2,4377
	1,9830	4,8009

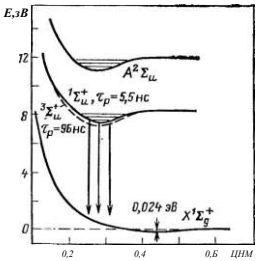


Рис. 34.5. Схема кривых потенциальной энергии и колебательных уровней молекулы Хег [1]. Генерация наблюдается на переходах из устойчивых колебательных уровней состояния отталкивательное состояние 'Sg; Тр— радиационное время жизни верхнего рабочего состояния

*Продол**окение табл. 34.2** **Продол**жение табл. 34.2*

Лазерные переходы в двухатомных молекулах

Активная среда Xeg (рис. 34.5), Ar^, Krа. ***Условия возбуждения: возбуюдение электронным пучком благородных газов при высоком давлении***

Молекула	'^возд'
Xea	0,1722
Ar,	0,1261
Kr^	0.1457

Активная среда ArF, ArCI, KrF ***и т. д. Условия возбуокдения: возбуждение электронным пучком смеси благородных газов и галогенидов при высоком давлении; также поперечный разряд при атмосферном давлении***

Молекула	^возд- ™	Молекула	"возд-
ArF	0,1933	XeCl	0,30792
ArCl	0,1750	XeCl	0,30816
KrBr	0,2065	XeF	0,34875
KrCl	0,2229	XeF	0,35091
KrF	0,2481	XeF	0,35097
KrF	0,2484	XeF	0,35114
KrF	0,2485	XeF	0,35365
KrF	0,2495	XeF	0,35354
XeBr	0,2818	XeF	0.483

Актиеная среда XeO.KrO. ***Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси благородных газов и Oг при высоком давлении***

Молекула	^возд.	Молекула	
XeO	0,5300	ArO	0,5377
XeO	0,5550	ArO	0,55781

Активная среда HgBr, HgCl. ***Условия возбуждения: возбуокдение электронным пучком при высоком давлении; фотодиссоциация или диссоциация*** HgEr, ***в электрическом разряде***

Молекула	'^БОЗД'	Молекула	
HgBr	0,5018	HgBr	0,5042
HgBr	0,5020	HgBr	0,5046
HgBr	0,5023	HgBr	0,55762
HgBr	0,5026	HgBr	0,55835
HgBr	0,5039		

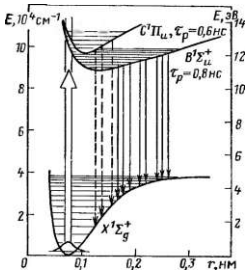


Рис. 34.6. Схема кривых потенциальной энергии и колебательных уровней лазера на молекулах Hг [1]. Лазерные переходы на системе полос Лаймана (B^X) отмечены вертикальными стрелками вниз (сплошные линии), переходы Вернера (C-^X) — пунктиром. Вертикальная стрелка из основного колебательного состояния Xv=o вверх соответствует переходам при электронном возбуждении; Tp — радиационное время жизни верхнего рабочего состояния

Продолжение табл. 34.2

Активная среда H^ (рис. 34.6). ***Условия возбуждения: импульсный разряд в*** Hg ***при*** P == 13 Па; ***возбуждение амктронным пучком*** (400 кэВ) Hg ***при P=*** 1,3-ь13 кПа; ***линии параводорода обозначены*** HoP

Молеку.па		**Моле кула**	
Hг	0,115976	н^P	0,114462
Hг	0,116136	HгP	0,114862
Ha	0,116617	H^p	0,116003
н.	0,117436	н^p	0,116390
Hз	0,117586	H^P	0,117456
Hг	0,118050	H,P	0,117830
н.	0,118936	HгP	0,120536
н.	0,120497	***П^P***	0,120929
Hз	0,120688	H,p	0,121767
н.	0,121734	H,P	0,122143
н.	0,121900	H,p	0,122874
н.	0,122358	HaP	0,123230
Ha	0,123004	HгP	0,123833
H,	0,123956	H,P	0,124167
H,P	0,109816	H,P	0,124620
H.P	0,110205	H^P	0,125202
H,P	0,111515	H^P	0,126839
H,P	0,111894	Hг	0,134226
Hг	0,140264	HгP	0,140728
Hг	0,143622	HгP	0,143262
Hг	0,159340	HгP	0,143757
Hг	0,159606	HгP	0,144061
Hг	0,144049	HгP	0,146017
Й	0,146383	H P	0,146411
Hг	0,14942	HгP	0,146841
Hг	0,149522	HгP	0,148652
Hг	0,151867	HгP	0,149171
Hг	0,152325	HгP	0,151570
Hг	0,155345	HгP	0,151994
Hг	0,15655	HгP	0,153494
Ha	0,156725	HгP	0,154493
Hг	0,157199	HгP	0,155010
Hг	0,15743	HгP	0,156629
	0,157739	HгP	0,156644
Hг	0,157919	HгP	0,156753
Hг	0,157998	HгP	0,157434
Hг	0,158077	HгP	0,157771
Hг	0,159131	HгP	0,157998
Hг	0,160448	HгP	0,158110
Hг	0,160623	HгP	0,158140
Hг	0,160751	HгP	0,158899
Hг	0,160839	HгP	0,159340
Hг	0,160902	HгP	0,159926
Hг	0,160829	HгP	0,160236
Hг	0,161033	HгP	0,160594
Hг	0,161166	HгP	0,160623
Hг	0,161319	HгP	0,160829
Hг	0,16148	HгP	0,160844
Hг	0,16165	HгP	0,160961
HгP	0,121946	HгP	0,161019
HгP	0,133856	HгP	0,161033
HгP	0,135984	HгP	0,161165
HгP	0,136799	HгP	0,161318
HгP	0,139895	HгP	0,161485

Продолокение табл. 34.2

Молекула	^возд-	Молекула	'•возд'
Н III	0,752464	Н III	1,305662
Н III	0,834950	НIII	1,316109
Н III	0,887613	НIII	1,50
Н III	0,889882	НIII	1,564193
НIII	1,116220	НIII	1,581950
и III	1,122205	Н III	1,63

Активная среда Dj. Условия возбуокдения: импульсный разряд в Da ***при*** P = 13-^400 Па; ***для возбуждения ультрафиолетового излучения нужен кроткий*** (2,5 не) ***интенсивный (сотни килоампер) разряд***

Как, мкм

0,111336	1	0,138879	0,16063
0,113770		0,143217	0,160650
0,114757		0,157585	0,160769
0,115650		0,158634	0,160681
0,118811		0,158642	0,160848
0,119753		0,158675	0,160955
0,120640		0,158714	0,161075
0,122800		0,158720	0,161080
0,123556		0,15890	0,161147
0,124239		0,15923	0,161165
0,124831		0,158983	0,161171
0,125329		0,159130	0,161198
0,115840		0,159137	0,161236
0,119005		0,159226	0,161251
0,119940		0,159257	0,161257
0,120821		0,160044	0,161318
0,124412		0,100086	0,161320
0,124997		0,160210	0,161324
0,130363		0,160354	0,161412
0,134590		0,160578	0,161658

Хеозд, мкм

0,827752	11	0,952367	1 1,477548
0,944156		0,953005	

Активная среда HD. ***Условия воабуокдения: импульсный разряд в*** HD ***при P*** = 134-400 Па

0,113864	0,151359	0,160365
0,114154	0,152989	0,160496
0,115198	0,156201	0,160465
0,117806	0,157136	0,160569
0,118995	0,157242	0,160647
0,119281	0,157267	0,160648
0,120103	0,158008	0,160674
0,121125	0,158085	0,160692
0,122837	0,158185	0,160747
0,124567	0,158253	0,160794
0,125276	0,158305	0,160827
0,130334	0,159378	0,160893
0,135507	0,159524	0,161005
0,140770	0,159713	0,161131
0,148843	0,160233	

Хвозд, мкм

0,917201

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Ыэг- Условия возбуждения: оптическая накачка лазерным излучением с длиной волны 473, 659, 454, 488 нм с Не е ***качестве буферного газа при P = 4*** кПа

Хвозд, мкм

0,5250	0,5417	0,791783
0,526333	0,5421	0,792947
0,5279	0,544150	0,793697
0,529952	0,544694	0,797474
0,529816	0,5453	0,797657
0,5338	0,5459	0,799091
0,5326	0,5472	0,799660
0,534283	0,5474	0,80011
0,5345	0,5485	0,8002
0,534930	0,5490	0,800840
0,536902	0,5491	0,80154
0,5375	0,549158	0,803650
0,5376	0,5504	0,803931
0,537814	0,5562	0,804447
0,5381	0,5568	0,805366
0,538497	0,5596	0,805611
0,538635	0,784930	0,8066
0,5394	0,786590	0,806943
0,540244	0,789740	0,80715
0,541311	0,789790	0,80859

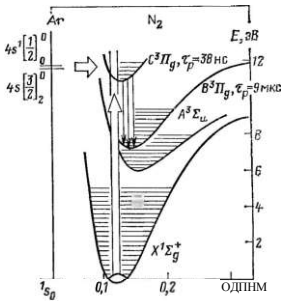


Рис. 34.7. Схема кривых потенциальной энергии и колебательных уровней лазера на молекулярном азоте в системе Ng-fAr [1]. Вертикальная стрелка из основного состояния вверх соответствует переходам при электронном возбуждении. Горизонтальная стрелка обозначает передачу энергии возбуждения с уровней аргона на верхний рабочий уровень азотного лазера; Тр — радиационное время жизни рабочего состояния

Активная среда Ng. Условия возбуждения: импул разряд высокой плотности N2 ***при P*** = 130-4-500 Па. ***Возбуждение N2 электронным пучком*** (300—400 кэВ) ***при*** P = 2,7 кПа, ***а также смеси*** Ar N2 (рис. 34.7) ***при высоком давлении***

Коза, мкм

0,315756	0,315827	0,315870
0,315778	0,315832	0,315874
0,315798	0,315844	0,315883
0,315803	0,315853	0,315891
0,315816	),315861	0,315900

Продолжение табл. 34.2

0,315911
0,315919
0,3364909
0,3365425
0,3365478
0,3366913
0,3369541
0,3369552
0,3369769
0,3369823
0,3369835
0,3369907
0,3370027
0,3370075
0,3370081
0,3370137
0,3370174
0,3370288
0,3370295
0,3370312
0,3370381
0,3370438
0,3370466
0,3370474
0,3370555
0,3370562
0,3370608
0,3370619
0,3370665
0,3370677
0,3370714
0,3370726
0,3370749
0,3370758
0,33707^2
0,3370797
0,3370812
0,3370816
0,3370826
0,3370919
0,3370986
0,3371031
0,3371075
0,3371082
0,3371113
0,3371121
0,3371135
0,3371143
0,3371172
0,3371266
0,3371307
0,3371366
0,3371392
0,3371421
0,3371429
0,3386428
0,3575460
0,3575798
0,3575980
0,3576112
0,3576194
0,3576250
0,3576320
0,3576571
0,3576613
0,3576778
O,a

),3804

0,4058
0,4278
0,7482187
0,748274
0,7485941
0,7486135
0,7486413
0,7486253
0,7487409
0,7488046
0,7488246
0,7489107
0,7489626
0,7489809
0,7490096
0,7490317
0,7491510
0,7491705
0,7492379
0,7493082
0,7493716
0,7493910
0,7495086
0,7495465
0,7495660
0,7496024
0,7497256
0,7497524
0,7497728
0,7498898
0,7499013
0,7499327
0,7499593
0,7499825
0,7500071
0,7500646
0,7500734
0,7501056
0,7501295
0,7501404
0,7501553
0,7502139
0,7502729
0,7502768
0,7503035
0,7503371
0,7503418
0,7503642
0,7503669
O,7503697
0,7503838
0,7503960

0,7504106
0,7504160
0,7504184
0,7504274
0,7504598
0,7504768
0,7505113
0,7505710
0,7505903
0,7506063
0,7506356
0,7508145
0,7509890
0,7510133
0,7510923
0,7511592

0,7511799
0,7512003
0,7512569
0,7513357
0,7514079
0,7515446
0,7515650
0,7517728
0,7518013
0,7574329
0,758105
0,758423
0,7586439
0,7587693
0,7589868
0,7591960
0,7593908
0,7594941
0,7597289
0,759870
0,7603477
0,7606374
0,7607626
0,7608801
0,7609853
0,7613612
0,7610759
0,7611082
0,7611514
0,7612105
0,7612528
0,7613260
0,7615347
0,7616994
0,7617357
0,7619288
0,7620844
0,7620943
0,7621161
0,7622235
0,7622565
0,7622959
0,7623256
0,7623264
0,7423311
0,7623582
0,7623686
0,7623918
0,7624220
0,7624690
0,7624924
0,7625115
0,7625445
0,7625709
0,7625770
0,7625812
0,7625906

0,7626007
0,7626044
0,7626114
0,7626180
0,7626207
0,7626360
0,7626560
0,7626700
0,7626749
0,7626826
0,7627806

Продолжение табл. 34.2

0,7628854
0,7629102
0,7630305
0,7631880
0,7632446
0,7633348

0,7634546
0,7634779
0,7635474
0,7636126
0,7636904
0,7637586
0,7638274
0,7639571
0,7639715
0,7640383
0,7640794
0,7641929
0,7642478
0,7644612
0,771206
0,7724562
0,7730032
0,7735040
0,7739632
0,7743859
0,775270
0,7752354
0,7753652
0,865331
0,865492
0,866089
0,866256
0,866345
0,866572
0,86676
0,8669223
0,866959
0,8671332
0,867554
0,868281
0,8682937
0,868374
0,868762
0,869136
0,8692580
0,869490
0,8696366
0,8697945
0,8698263
0,8699397
0,8700670
0,8700684
0,8701481
0,8701718
0,8702541
0,8702681
0,8703093
0,870331
0,8703457
0,8704549
0,8707478
0,8710118

0,8710273
0,8712956
0,8713533
0,871450
0,8715519
0,871644
0,8716718
0,8717377
0,8717970
0,8718571
0,8718654
0,8719537
0,8719562
0,8719562
0,8719791
0,8720251
0,8720284
0,8720308
0,8720419
0,8720848
0,8721155
0,8721327
0,8721718
0,8721971
0,8722007
0,8722220
0,8722341
0,8722569
0,8722836
0,8723057
0,8726333
0,8728430
0,8730453
0,8732394
0,8734247
0,8735995
0,8737644
0,8739162
0,8740559
0,8742917
0,884129
0,8845349
0,8846598
0,884758
0,884920
0,885026
0, 885261
0,885460
0,8856271
0,885649
0,8858470
0,8861195
0,886153
0,886256
0,886278
0,886697
0,886799
0,887121
0,887531
0,887918
0,8880521
0,888288
0,8884527
0,8886204
0,8886378
0,8887756
0,8889111

0,8889738
0,8890243
0,8891133
0,8891769
0,8892149
0,8892940
0,8896001
0,8898930
0,8899078
0,8901733
0,8902420
0,8902711
0,890372
0,8904419
0,890566
0,8906097
0,8906649
0,8906994
0,8907920
0,8908808
0,8908878
0,8909451
0,8909527
0,8909750
0,8910132
0,8910480
0,8910612
0,8911001
0,8911063
0,8911280
0,8911502
0,8911538
0,8911608
0,8911898
0,8912139
0,8918033
0,8920184
0,8922249
0,8924223
0,8926099
0,8927865
0,8929509
0,8931019
0,8933580
0,965389
0,965846
0,967599
0,967270
0,967758
0,967943
0,968061
0,969552
0,969879
1,043588
1,044261
1,044992
1,045519
1,046117
1,046669
1,047195
1,047691
1,047961
1,048173
1,048634
1,049060

Продолжение табл. 34.2

1,049478	1,230261	3,31149
1,049873	1,231093	3,31526
1,050231	1,231881	3,31801
1,050512	1,232624	3,45118
1,050717	1,233333	3,45758
1,05083	1,233994	3,46283
1,052259	1,234631	3,46709
1,052622	3,29372	3,47032
1,053093	3,30076	8,18161
1,053471	3,30665	8,20882

Активная среда Big. Условия возбуюодения: оптическая накачка аргоновым лазером и лазерами на красителях

0,5929	0,6550	0,7398
0,6160	0,6809	0,7408
0,6239	0,7006	0,7439
0,6300	0,7013	0,7468
0,6339	0,7292	0,7471
0,6414	0,7301	0,7475
0,6422	0,7335	0,7482
0,6576	0,7364	0,7543
0,6582	0,7366	0,7551
0,6603	0,7376	

Активная среда Sg. Условия возбуокдения: фотодиссоциация под действием ультрафиолетового излучения или оптическая накачка лазером на красителе

0,365	1,0920	1.099
1,086	1,0923	1.100
1,0915	1,0941	1,1587
1,0917	1,0946	

Активная среда Tcg. Условия возбуждения: оптическая накачка аргоновым лазером с длиной волны 476,5 нм

0,5571	0,5786	0,6082
0,5575	0,5787	0,6085
0,5578	0,5790	0,6087
0,5579	0,5793	0,6089
0,5626	0,5794	0,6162
0,5643	0,5797	0,6165
0,5647	0,5798	0,6168
0,5649	0,5841	0,6170
0,5650	0,5849	0,6204
0,5696	0,5851	0,6278
0,5701	0,5857	0,6287
0,5711	0,5859	0,6288
0,5714	0,5865	0,6295
0,5715	0,5869	0,6379
0,5719	0,5870	0,6381
0,5720	0,5874	0,6388
0,5721	0,5924	0,6465
0,5724	0,5927	0,6473
0,5766	0,5934	0,6477
0,5767	0,5936	0,6484
0,5773	0,6002	0,6561
0,5780	0,6004	0,6569
0,5783	0,6005	0,6574
0,5784	0,6008	0,6581
0,5785	0,6009	

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Pr. Условия возбуждения: возбуюдение электронным пучком смеси Ne и Fa или He и Fj; также возбуждение в электрическом разряде

0,15671
0,15748
0,15759

Активная среда Brg. Условия возбуокдения: возбуждение электронным пучком или в электрическом разряде смеси Ar и BFJ

0,2915	0,61318	0,67456
0,55020	0,61368	0,67506
0,55053	0,63612	0,74582
0,58048	0,63654	0,74638
0,58090	0,63705	0,74641
0,61272	0,67408	0,74704
0,61316	0,67455	

Активная среда Clg. Условия возбуокдения: возбуждение электронным пучком смеси (300 Па) и He (1,2 МПа)

Хвозд, мкм
0,2580

Активная среда Ig. Условия возбуждения: оптическая накачка паров I2 аргоновым лазером или лазером на красителе; ультрафиолетовые линии возбуждаются электронным пучком в смеси Ar и CI3D, а таюне при накачке импульсными лампами

Хвозд, мкм		
0,6592	0,9036	1,1207
0,6645	0,9037	1.1214
0,6936	0,9047	1.1215
0,7114	0,9060	1,1224
0,8144	0,9274	1,1255
0,8358	0,9288	1,1327
0,8578	0,9295	1,1336
0,8804	0,9305	1,1347
0,8813	0,9518	1.1349
0,9037	0,9545	1.1350
0,9047	0,9555	1,1454
0,9060	0,9766	1,1464
0,9274	0,9963	1,20359
0,9288	0,9973	1,217
0,9295	1,0019	1,25623
0,9305	1,0053	1,25663
0,9518	1,0225	1,26324
0,9545	1,0245	1,274
0,9555	1,0255	1,27883
0,9766	1,0274	1,27945
0,9963	1,0534	1,28177
0,9973	1,0775	1,28210
1,0019	1,0788	1,28433
1,0053	1,1068	1,28478
1,0225	1,1073	1,2870
1,0245		1,28722
1,0255		1,28754
1,0274		1,28931
1,0534		1,28972
1,0775		1,2925
1,0788		1,294
1,1068		1,304
1,1073		1,30509

1,30536	1,31487	1,33636
1,30620	1,3153	1,33582
1,30748	1,3192	1,33624
1,30864	1,320	1,33644
1,30890	1,32916	1,338
1,31095	1,33029	1,34105
1,31130	1,3310	1,33108
1,31180	1,3324	1,34136
1,31205	1,3333	1,34155
1,31338	1,3349	1,34156
1,31371	1,33509	1,34211
1,31462	1,33530	1,34219

Активная среда C1F. ***Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси*** Ne, Fj ***и*** Cl2 ***"***

Хвозд, мкм

0,285

Активная среда HF. ***Условия возбуждения: возбуждение колебательных уровней в химических реакциях; оптическая накачка для возбуждения колебательно-вращательных переходов***

Хвак. мкм

Полоса 1—0	***Полоса*** 2—1	3,0052
2,41	2,6668	**3,8482**
2,43	2,6963	**3,0935**
2,45	2,7275	3,1411
2,48	2,7604	3,1912
2,551	2,7952	3,2438
2,579	2,8319	3,2991
2,6084	2,8705	***Полоса*** 4—3
2,6396	2,9111	2,9221
2,6729	2,9539	2,9549
2,7075238	2,9989	2,9896
2,7440	3,0461	3,026
2,7826	3,0958	3,065
2,8231	3,1480	3,1454
2,8657	3,2029	3,1492
2,9103	3,2603	***Полоса*** 5—4
2,9573	3,2206	3,0982
3,0064	***Полоса*** 3—2	3,1350
3,0582	2,7902	3,1640
3,1125	2,8213	3,2151
3,1695	2,8542	3,258
3,2292	2,8890	3,3044
3,2919	2,9257	***Полоса*** 6—5
	2,9644	3,333
		3,377

Чисто вращательные переходы

r = 0	V = 1	
10,1978	12,2619	10,5819
10,4578	12,7006	10,8117
10,7439	13,1877	13,2211
11,0573	13,7277	14,2881
11,4033	15,0163	20,9393
11,7854	18,8010	19,55
12,2082	20,1337	
12,6781	21,6986	t; = 3
13,2009	36,5	11,5408
13,7841	42,4	19,1129
14,4405	50,8	20,3513
15,1744	63,4	21,7885
16,0215	84,4	и = 4
18,09	126,5	19,915
19,35		
20,835		

Активная среда DF. ***Условия возбуждения: колебательные уровни в*** DF ***возбуждаются при химических реакциях, инициируемых электрическим разрядом, фотолизом или чисто химическим путем***

Хвак> МКМ

Полоса 3—1	***Полоса*** 2—1	3,8903
1,836	3,6363	3,9272
1,844	3,6665	3,9654
1,857	3,6923	4,0054
Полоса 1—0	3,7310	4,0464
3,493	3,7651	4,0895
3,521	3,8007	4,1337
3,550	3,8375	4,1789
3,581	3,8757	***Полоса*** 4—3
3,612	3,9155	3,8503
3,645	3,9565	3,8817
3,679	3,9995	3,9145
3,716	4,0435	3,9487
3,752	4,0893	**3,9843**
3,7901	4,'1369	**4,0212**
3 8298	4,1862	**4,0595**
3,'8707	***Полоса*** 3—2	***Полоса*** 4—3
3,9133	3,7563	
3,9572	3,7878	4,0054
4,0032	3,8206	4,0399
4,0502	3,8547	4,0759
		4,1135

Чисто вращатЕльные переходы

v = 0

H^C1

13,8720	I	17,4923	22,8637
14,0994		17,9874	23,8485
14,3434		18,522	24,9367
16,2125		20,4106	26,1462
16,6085		21,1556	27,508
17,0340		21,9706	

Активная среда HC1. ***Условия возбуждения: возбуждение при химических реакциях в смеси Нг и ClgO или Cl^ и*** H1, ***инициируемых электрическим 'разрядом или фотолизом: вращательные линии возбуждаются при импульсном разряде в смесях*** Cl2 ***и*** **CH3Cl,** Cl2 ***и*** CH, ***или*** C!2, Нг ***и*** **CC1F3**

Хвак, мкм

Полоса 1—О	3,7383	
	3,7710	4,0295
	3,8050	№'C1
3,5728	3,8401	3,8536
3,6026	3,8768	3,8864
3,6337	3,9149	3,9205
3,6660	№7C1	3,9560
3,6996	3,7098	H"C1
3,7341	3,7408	16,664
3,7707	3,7735	17,997
3,8081	3,8074	19,122
H3'C!	3,8425	*V* = 1
3,6362	***Полоса 3—2***	H»C1
3,6685	НЧ5С1	17,125
3,7021	3,8509	17,575
3,7370	3,8840	18,035
Полоса 2—1	3,9181	18,555
НЗБС1	3,9536	19,7002
3,7071		

Продолжение табл.

20,3455	№'C1	20,9991
21,0470	16,765	24,3178
21,8127	18,593	
22,6514	19,145	
23,5705	24,6177	
24,5833	**t = 2**	19,783
25,7040		19,821
	19,183	

Продолжение табл. 34.2

Чисто вращательные переходы		
t^ = 0	o = 1	22,855
19,399		31,368
20,360	21',546	32,799
20,896	30,445	40,526
20,949	31,849	
21,501	33,409	
22,136	0 = 2	
30,948	**22,226**	23,436
32,469		29,786

Активная среда DC1. ***Условия возбуждения: возбуждение при химической реакции Cl2, инициируемой электрическим разрядом;*** P^ = 200 Па, P^ = 300 Па

Полоса 2—1	5,1811	1	5,3562
D35C1	5,2118		5,3889
5,0445	5,2435		5,4577
5,0743	5,2760		5,4935
5,1049	5,3097		5,5304
5,1363	5,3443		Ds'CI
5,1688	5,3799		5,3629
D3'C1	Ds'Cl		5,3956
5,0514	5,1879		5,4295
5,0811	5,2186		
5,1118	5,2503		***Полоса 5—4***
5,1431	5,2829		D36C1
Полоса 3—2	***Полоса*** 4—3		5,5084
			5,5423
	D35C1	1	5,5776
5,1511	5,3244	il!	5,6137

Активная среда DBr. ***Условия возбуждения: возбуждение при химической реакции O^ + Вгв, инициируемой импульсным разрядом;*** P^ = 80 Па, Рц = 40 Па

Авак)

Полоса 3—2	***Полоса 4—3***	6,1216
D'»Br	D'9Br	6,1562
5,8049		6,1918
5,8620	6,0209	6,2289
	6,0529	***Полоса*** 5 - 4
5,9246	6,0858	D'sBr
5,9573	6,1200	6,2566
	6,1546	6,2916
	6,1903	6,3279
	6,2272	DsiBr
5,8629	DsiBr	6,2237
5,8944	6,0225	6,2581
5,9261	6,0544	6,2932
5,9590	6,0873	6,3294

Актиная среда HBr. ***Условия возбуждения: возбуждение при химической реакции*** Hj + Br.,, ***инициируемой иМтjMCHbiM разрядом: 'P^*** = 200 Па ***и*** Pjjr = 300 Па

Лвак, мкм

Полоса 1—0	4,2295	H81Br
H^-Br	4,2633	4,3255
4,0170	4,2988	4,3585
4,0470	4,3354	4,3931
4,0783		4,4307
4,1107	4,1658	4,4658
4,1442	4,1975	4,5047
№1Br	*4,2994*	***Полоса 4—3***
4,0176	4,3359	H'sBr
4,0475		4.5330
4,0788	***Полоса*** 3—2	4,5691
4,1112	H'»Br	4,6070
4,1448	4,3250	4,4663
4,1796	4,3579	H^iBr
Полоса 2—1	4,3925	4,5335
H«Br	4,4281	4,5696
4,1653	4,4652	4,6076
4,1970	4,5041	4,6467

Активная среда NO. ***Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси*** NOCl (470 Па) ***и*** He (780 Па), ***а также фотодиссоциация*** NOCl ***или*** NO ***в стой с*** NOa

Лвак. мкм

1,2237	6,0267	6,2110
1,1069	6,0324	6,2191
2,6072	6,0386	6,2249
2,6380	6,0402	6,2328
5.8462	6,0419	6,2381
5,8549	6.0543	6,2511
5,8584	6,0628	6,2602
5,8706	6,0673	6,2645
5,8789	6,0801	6,2778
5,9036	6,0884	6,2865
5,9083	6,0934	6,2913
5,9423	6,1015	6,2998
5,9546	6,1204	6,3051
5,9550	6,1417	6,3136
5,9632	6,1538	6,3191
5,9673	6,1546	6,3274
5,9756	6,1576	6,3336
5,9799	6,1663	6,3764
5,9882	6,1792	6,3894
5,9931	6,1838	6,3980
6,0010	6,1921	6,4031
6,0054	6,1972	6,4262
6,0192	6,2055	6,4321

продолжение табл. 34.2 ***Продолжение табл. 34.2***

Активная среда CN. ***Условия возбуждения: возбуждение электрических и колебательных переходов при фотодиссоциации, а также при электрическом разряде в парах*** HCN

Kгы, мкм		
1,09966	1,10485	1,41911
1,09963	1,10445	1,41954
1,09965	1,10521	1,42005
1,09974	1,10603	1,42065
1,09987	1,10689	1,42132
1,10007	1,10726	1,42207
1,10031	1,10782	1,42289
1,10061	1,1879	1,42380
1,10096	1,10981	1,42478
1,10136	1,11090	1,42583
1,10082	1,11200	1,42696
1,10232	1,11321	1,42808
1,10288	1,41830	1,42945
1,10348	1,41849	1,42081
1,10414	1,41876	

Активная среда OH. ***Условия возбуждения: фотолиз в смеси Оз и*** Na; ***импульсный разряд в смеси*** O3, Hg ***и*** He; ***вращательные переходы при импульсном в смеси SFg, Hs и Og***

МКМ		
2,93432	14,640	14,655
2,96999	14,646	14,669
3,07877	14,662	15,256
3,11677	15,289	15,274
	15,294	18,455
3,32615	15,313	18,492
3,27653	18,788	18,502
o==0	18,828	18,532
12,273	18,849	19,555
12,279	18,878	19,594
12,660	20,05	19,619
12,663	21,48	19,650
13,073	21,57	20,87
13,079	23,14	20,93
13,088	23,26	22,33
13,525	25,11	22,45
13,538	25,28	24,07
13,547	27,47	24,18
13,557	27,71	26,12
14,043	t;=1	26,30
14,059	13,632	t;=2
14,067	13,642	
14,081	14,118	19,273
14,620	14,129	19,321

Активная среда OD. ***Условия возбуждения:*** *импульсиШ разряд в смеси SF^, Dj и O^*

Авак. МКМ		
v=0	19,102	19,696
18,121	19,121	19,704
18,138	19,141	20,271
18,590	19,161	20,228
18,603	19,662	20,296
18,624	19,681	30,313

В 1	*в*
608,0 *нм- Полоса Ангстрема ,* ***1)*** = » ***/'Я***	*Полоса ГерцВерга.*
	20е, *Вим (часть -f-u положительной группы)*
8 6 Ч 2	***g*** = ***h*** *\Лазерные переходы (3,03-5,38пкм) В колебательно-вращательной, системеX'Z* "X^o*

Рис. 34.8. Схема части лазерных переходов на молекулах CO, показывающая электронные переходы в полосе Ангстрема и колебательно-вращательные переходы в основном состоянии молекулы CO *X* «2+ [7]

Продоло1сение табл. 34.2

Активная среда CO (рис. 34.8). ***Условия возбуждения: возбуждение электронных состояний в импульсном разряде при высокой плотности тока; типичное давлению для ультрафиолетовых линий 8*** кПа, ***для линий видимого диапазона— 90—250*** Па; ***возбуждение вращательное колебательных переходов в импульсном или непрерывном разряде в смеси*** CO ***и*** Ng ***(иногда*** с He, Xe, Hg), ***при газодинаЛинеском расширении, е поперечном электрическом разряде, а также в химических реакциях***

Авдк, МКМ		
0,181085	0,483091	0.519825
0,187831	0,483202	0,519888
0,189784	0,483297	0,519952
0,195006	0,483602	0,558566
0,197013	0,483638	0,558903
0,450374	0,483658	0,559213
0,450508	0,518103	0,559498
0,450627	0,518355	0,559757
0,450728	0,518586	0,560198
0,450816	0,518793	0,560380
0,450888	0,518987	0,560536
0,450947	0,519145	0,560665
0,482082	0,519298	0,560769
0,482290	0,519426	0,560849
0,482483	0,519508	0,560856
0,482659	0,519531	0,560967
0,482820	0,519617	0,561054
0,482964	0,519633	0,561114
	0,519740	0,561149

0,604536
0,604983
0,605400
0,605787
0,606464
0,606756
0,607016
0,607243
0,607438
0,607604
0,607734
0,607752
0,607831
0,607899
0,608018
0,608102
0,608155
0,608175
0,658285
0,658805
0,659287
0,659729
0,660130
0,660438
0,660813
0,661093
0,661154
0,661427
0,661334
0,661426
0,661536
0,661695
0,661817
0,662102
0,662186
0,662216
2,3474
2,3769
2,4380
2,4344
2,4696
2,5019
2,5350
2,5689
2,6036
2,6392
2,6756
2,6886
2,6914
2,7129
2,7262
2,7290
2,7319
2,7511
2,7647
2,7676
2,7705
2,7903
2,8042
2,8071
2,8101
2,8306
2,8446
2,8476
2,8507
2,8892
2,8923
2,9288
2,9319
2,9351

2,9725
2,9757
2,9789
3,0174
3,0206
3,0668

Полоса 1—0

4,735872
4,745130
4,754501
4,763984
4,773582
4,783295
4,793123
4,803067
4,813129
4,823310
4,833609
4,844029
4,854569
4,865231
4,876016

Полоса 2—1

4,767821
4,776892
4,786076
4,795373
4,804785
4,814312
4,823954
4,833714
4,843591
4,853586
4,863700
4,873935
4,884291
4,894769
4,905369
4,916094
4,926943

Полоса 3—2

4,846781
4,856233

4,875490
4,885296
4,895221
4,905267
4,915434
4,925723
4,936136
4,946672
4,957333
4,968120
4,979035
4,990016
5,001277
5,012578
5,023976
5,035544
5,047242
5,059073
5,071040
5,083144
5,095386
5,107766
5,120267

Полоса 5—4

4,£
4,953240
4,962772
4,972425
4,982220
4,992099
5,002121
5,012268
5,022539
5,032938
0,043462
5,054117
5,064899
5,075812
5,086856
5,098033
5,109343
5,120787
5,131252

5,M4084
5,155938
5,167931
5,180064
5,192338
5,204755
5,217312
5,230020
5,242872
5,255870
5,269018
5,282316

Полоса 6—5

5,C
5,017940
5,027635
5,037454
5,047397
5,057467
5,067663
5,077988
5,088440
5,099023
5,109734
5,120577
5,131555
5,142663
5,153909
5,165289
5,176806
5,188460
5,200254
5,21187
5,224262
5,236479
5,248840
5,261343
5,273997
5,286796
5,299744
5,312842
5,326091
5,339493
5,353049

Полоса 7—6

5,074432
5,084106
5,094028
5,104017
5,114134
5,124408
5,134757
5,145264
5,155902
5,166672
5,177575
5,188617
5,199792
5,211102
5,222555
5,234145
5,245874
5,257745
5,269759
5,281916
5,294218
5,306666
5,319261
5,332005
5,344899
5,357945
5,371143
5,384494
5,398001
5,411665

Полоса 8—7

5,142062
5,151996
5,162000
5,172164
5,182459
5,192888
5,203447
5,214142
5,224972
5,235937
5,247038
, 5,258279
5,269659
5,281183

5,292846
5,304651
5,316600
5 328694
5,'340935
5,353322
5,365859
5,378545
5.391382
5,404372
5,417516
5,430815
5,444270
5,457884
5.471632
5.485591
5,499688

Полоса 9—8

5,108900
5,100430
5,092002
5,201370
5,211315
5,221392
5,231603
5,241946
5,252424
5,263039
5,273789
5,284678
5,295704
5,306870
5,318176
5,329624
5,341216
5,352955
5,364837
5,376865
5,389039
5,401364
5,413837
5,426463
5.439219
5,452172
5,465259
5,478502
5,491904
5,505464
5,519186
5,553070
5,547118
5,561330
5,575710

Полоса 10—9

5,096828
5,104413
5,112118
5,119944
5,127892
5,135961
5,272122
5,282243
5,292498
5,302890
5,313418
5,324085
5,334893

5,345838
5,356924
5,368153
5.379526
5,391045
5,402707
5,414516
5,426477
5,438584
5,450840
5,463249
5,475810
5,488524
5,501394
5,514421
5,527606
5,540950
5,554455
5,568122

Полоса 11—10

5,122753
5,129726
5,136819
5,144032
5,151366
5,158822
5,166400
5,174100
5,181924
5,189871
5,334601
5,354901
5,365340
5,375920
5,386640
5,397499
5,408504
5,419652
5.430943
5,442381
5,453966
5,465699
5,477588
5,489622
5,501808
5,514147
5,526640
5,539288
5,552093
5,565057
5,578179
5,591463
5,604909
5,618619
5,632293
5,646235

Полоса 12—11

5,179608
5,186476
5,193387
5,200459
5,207655
5,214974
5,222417
5,229984
5,237677
5,245496

5,429350
5,439978
5,450750
5,461666
5,472735
5,483932
5.495289
5,506793
5.518447
5.530252
5,542208
5,564315
5,566589
5,579010
5,591588
5,604325
5,617221
5,630278
5,643498
5,656881
5,670430
5,684145
5,698029
5,712083

Полоса 13—12

5,343257
5,351719
5,360314
5,369042
5,377903
5,386899
5,396031
5,405298
5,414703
5,424245
5,433926
5,516474
5,527444
5,505651
5,538558
5,549827
5,561252
5,572816
5,584536
5,595412
5,608443
5,620630
5,632975
5,645485
5,658148
5,670974
5,683961
5,697113
5,710431
5,723916
5,737568
5,751390
5,765384
5,779551
5,793891
5,808408
5,823103

Полоса 14—13

5,354648
5,362186
5,369854
5,377654
5,385585
5,393649
5,401846
5,410177
5,418642
5,427242
5,435978
5,444850
5,583870
5,594893
5,606068
5,617391
5,628872
5,640505
5,652298
5.664243
5,676348
5,688612
5,701037
5,713623
5,726379
5,739293
5,752373
5,765620
5,779036
5,792622
5,806380
5,820310
5,834415
5,848696
5,863154

Полоса 15—14

5,374479
5,381078
5,387807
5,394666
5,401656 ^
5,408780
5,416030
5,423415
5,430932
5,438584
5,446369
5,454289
5,462344
5,470535
5,686687
5,698230
5,709930
5,721786
5,733804
5,745984
5,758322
5,770827
5,783496
5,796340
5,809343
5,822516
5,835859
5,583870
5,594893
5,606068
5,849374
5,863063
5,876926
5,890965
5,905182
5,919579
5,934157
5,948917

Полоса 16—15

5,746341
5,757944
5,769382
5,781150
5,793071
5,817413
5,829830
5,842415
5,855168
5,868096
5,881189
5,894455
5,907895
5,921510
5,935301
5,949271
5,963420
5,977751
5,c

Полоса 17—16

5,842407
5,854229
5,866221
5,878384
5,890704
5,903202
5,915865
5,928701
5,941711
5,954841
5,968257
5,981799
5,995510
6,009406
6,023483
6,037744
6,052189

Полоса 18—17

5,941314
5,953562
5,965936
5,978508
5,991256
6,004170
6,017267
6,030541
6,043400
6,05760
6,07142
6,08542
6,09960
6,11397
6,12852
6,14327

Полоса 19—18

6,030715
6,043187
6,055827
6,068653
6,081656
6,094841
6,121753
6,149406
6,163511
6,177806
6.192291
6,221841

Полоса 20—19

6,122525
6,135248
6,148152
6,161240
6,174509
6,187966
6,215438
6,229461
6,243673
6,258077
6,272677
6,287472
6,302466

Полоса 21—S

6,191453
6,204067
6,216856
6,229843
6,243012
6,256366
6,269915
6,297578
6,311705
6,326023
6,340538
6,355252
6,370176
6,385283

Полоса 22—21

6,300749
6,313813
6,327064
6,340507
6,354144
6,367975
6,382004
6,410658
6,440113
6,455148
6,485838

Полоса 23—22

6,413510
6,427033
6,640760
6,454686
6,468812
6,497679
6,512417
6,527363
6,542518
6,557884
6,573463

Полоса 24—23

6,502437
6,516055
6,529870
6,543890

6,558117
6,572552
6.587194
6,602046
6,617109
6,632387
6,647880
6,679519

Полоса 25—24

6,607691
6,621596
6,635713
6,650037
6,664574
6,679326
6,694287
6,709469

Полоса 26—25

6,702067
6,730277
6,744698
6,759342
6,774209
6,789276
6,804577
6,820100
6,835854

Полоса 27—26

6,842243
6,854639
6,871970
6,887152
6,902569
6,918218
6,934101

Полоса 28—27

6,942824
6,957669
6,972747
6,988057
7,003596
7,01937,1
7,035382

Полоса 29—28

7,076735
7,092158
7,107821
7,123720
7,139864
7,156250

Полоса 30—29

7,199637
7,215418
7,231448
7,247721
7,264248

Полоса 31—30

7,310709
7,326587
7,342742
7,359153
.
7,Г
7,;

Полоса 32—31

7,441563
7,457822
7,474367
7,491175
7,508252
7,525593
7,543207

Полоса 33—32

7,593623
7,610553
7,627777
7,645277
7,663057
7,681105
7,734191
7,751571

Полоса 34—33

7,769230
7,787173
7,805408
7,823924

Полоса 35—34

7,879916
7,897740
7,915858
7.934266
7,952969
8,031109
8,049391
8,067991
8,086665
8,106093
8,206919
8,226011
8,245417
8,265146
ИОЮ

Полоса 7—6

5,303284
5,314516
5,325877
5,337376

Полоса 8—7

5,328437
5,339330
5,350355
5,367272
5,372811
5,384241
5,395810
5,407516

Полоса 9—8

5,377032
5,387850
5,398801
5,409888
5,421112
5,4322471
5,4439721
5,4556001
5,4673911
5,4793111
5,4913771
5,5035831

Полоса 10—9

5,437800	5,733698	6,039534
5,448674	5,741227	
5,459684	5,746076	6.063494
5,470881	5,752912	6,065767
5,482117	5,758611	6,075932
5,493543	5,764755	6.079138
5,505110	5,771303	0,088540
5,516821	5,776747	0.092683
5,528674	5,784148	6,101318
5,540673	5,788893	6,106404
	5,797155	6,114263
5,500027	5,798443	6.120296
5,510954	5,801198	6,127383
5,522022	5,810042	6,139855
5,533232	5,810319	6,140673
5,544580	5,813656	6,152366
5,556074	5,821796	6,154138
5,567715	5,826267	6,165049
5,574745	5,833703	6,167780
5,579476	5,839055	6,177904
5,585871	5,845769	6,181597
5,591415	5,851981	6,190935
5,597139	5,857987	6,195595
5,603490	5,865079	6,204140
5,608550	5,870367	6,209772
5,615709	5,882903	6,217521
5,620109	5,892408	6,230817
5,628080	5,895604	6,231077
5,631813	5,904387	6,233577
5.640600	5,908465	6,244817
5,643666	5,916519	6,256511
5,651276	5,921487	6,258735
5,653272	5,928814	6,289624
5,655664	5,934676	6,272833
5,662607	5,941269	6,282915
5,667813	5,948030	**6,287118**
5,674081	5,953887	
5,680114	5,964829	6,301586
5,685704	5,966669	6,310036
5,685704	5,976868	6,323871
5,692566	5,979617	6,337216
5,697477	5,989075	6,349964
5,705170	5,992728	6,350412
5,709398	6,001439	6,352094
5,717932	6,006059	6,363789
5,721472	6,013970	6,366487
5,729687	6,019459	6,377348
5,7	6,026667	6,381068
	6,033077	6,391091
		6,^

Многоатомные молекулы

Активная среда XejCl [8]. ***Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси*** Аг, Хе м CCl

Лвак, мкм

0,518

Активная среда XegBr [9]. ***Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси*** Аг, Хе м CHBrgд

Авак. мкм

0,440

Активная среда KraP [9]. ***Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком*** Аг, Кг ***и*** NF3

Авак, мкм

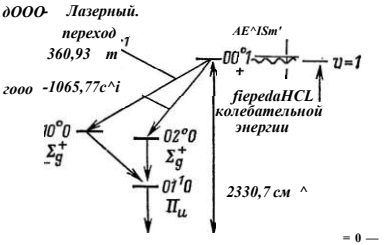
0,430

Активная среда О3. Условия возбуждения: оптическая накачка СО^-лазером

Хвдк, мкм

121
163,61
171,5

дООО- Лазерный.



(Основное состояние) (Основное состояние)

Рис. 34.9. Схема энергетических уровней молекул N2 и CO2 [1]. Отсчет энергии ведется от основных состояний N2(X'S^t.=o) и CO2 (OO°O). Показаны селективное возбуждение уровня 00°1 молекулы CO2 путем передачи энергии с колебательного уровня ц=1 молекулы N2 и лазерные переходы между уровнями CO2

Активная среда CO2. Условия возбуждения: непрерывный разряд в смеси CO2, Ng ***и*** He (рис. 34.9) ***{соотношение в смеси*** 1:2,5:10); ***возбуждение в продольном разряде с прокачкой газовой смеси, в режиме газодинамического лазера (ГДЛ)', химический СО^-лазер с резонансной передачей энергии возбуждения от молекул*** HF ***или*** DF; ***импульсное возбуждеие в поперечном разряде при высоком давлении {ТЕА); максимальная моцность*** (10,6 мкм) 250 кВт (е ***режиме ГДЛ), энергия*** 1000 Дж (е ***режиме ТЕА)***

Лвак, мкм

Молекула «С^Ог

Полоса 102—101

4,3203	4,3612	4,3745
4,3249	4,3644	4,3779
4,3276	4,3677	4,3814
4,3549	4,3711	4,3849
4,3580		

Молекула ^С^Ю^

Полоса 101—100

4,314	4,371	4,385
4,340	4,377	4,392
4,354	4,382	4,398
4,346		

Молекула i^cwOj

Полоса 001—020

9,0702655	9,2605258	9,6035727
9,0757663	9,2713577	9,6212185
9,0814571	9,2824434	
9,0873410	9,2937852	9,6574156
9,0934211	9,3053853	9,6750700
9,0997003	9,3172460	9,6948301
9,1061815	9,3293695	9,7139973
9,1128676	9,3417579	9,7334730
9,1197615	9,3544134	9,7532586
9,1268660	9,3673380	9,7733552
9,1341839	9,3805340	9,7937640
9,1417179	9,3940033	9,8144862
9,1494708	9,4147242	9,8355229
9,1574453	9,4288857	9,8568751
9,1656440	9,4433275	9,8785439
9,1740695	9,4580515	9,9005300
9,1827244	9,4730598	9,9228344
9,1916114	9,4883540	9,9454579
9,2007329	9,5039361	9,9684012
9,2100915	9,5198079	
9,2196895	9,5359711	10,0152438
9,2295296	9,5524275	10,0391561
9,2396141	9,5691788	10,0633844
9,2499453	9,5882267	10,0879349

Полоса 001—100

9,9985568	10,2331666	10,6531558
10,0049238	10,2466246	10,6745861
10,0115934	10,2603814	10,6963859
10,0185643	10,2744384	10,7185600
10,0258352	10,2887964	10,7411135
10,0334048	10,3034581	10,7640517
10,0412720	10,3184241	10,7873802
10,0494358	10,3336965	10,8111046
10,0578953	10,3492772	10,8352307
10,0666497	10,3651683	10,8597648
10,0756984	10,3813718	10,8847131
10,0850408	10,3978901	10,9100823
10,0946764	10,4232632	10,9358790
10,1046049	10,4405795	10,9221103
10,1148262	10,4582196	10,9887835
10,1253400	10,4761866	11,0159060
10,1361464	10,4944835	11,0434858
10,1472454	10,5131136	11,0715308
10,1586374	10,5320802	11,1000493
10,1703225	10,5513866	11,1290499
10,1823014	10,5710372	11,1585415
10,1945745	10,5910352	11,1885334
10,2071425	10,6113848	11,2190349
10,2200062	10,6320902	11,2500559

Полоса 002—021

9,209171	9,352366	**9,589785**
9,217773	9,364555	
9,226615	9,377018	9,624027
9,235699	9,389757	9,641609
9,245029	9,402774	9,655900
9,254607	9,450554	9,677702
9,264436	9,464848	9,696217
9,274517	9,479432	9,715046
9,284854	9,494307	9,734191
9,295448	9,509476	9,753653
9,306302	9,524939	9,773433
9,316821	9,540700	9,793533
9,328800	**9,556760**	9,813954
9,340448	**9,573121**	

Полоса 002—101

10,1	10,337367	**10,626664**
10,157295	10,355455	**10,647099**
10,168257	10,367847	**10,667888**
10,179508	10,383545	**10,689036**
10,191050	10,399550	**10,710547**
10,202883	10,415866	10,732425
10,215008	10,458029	10,754676
10,227424	10,475449	10,777305
10,240133	10,493192	10,800317
10,253135	10,511259	10,823718
10,266431	10,529654	10,847513
10,280023	10,548380	10,871709
10,293911	10,567440	10,896312
	10,586838	10,921327
10,322582	10,606578	

Полоса 003—102

10,2	10,420594	10,706519
10,302426	10,53097	10,727749
10,316157	10,54916	10,749339
10,330184	10,56762	10.771295
10,344505	10,58646	10,793621
10,359124	10,60562	10,816324
10,374040	10,665124	10,839408
10,389256	10,685646	10,862879
10,404773		

Полоса 004—103

10,55376		
10,57170		

Полоса 001—110

10,591025	10,930707	11,007301
10,789077	10,94235(	11,015934
10,890194	10,951486	11,029744
10,900964	10,972615	11,083630
10,921469	10,985266	

Полоса 011—110

	10,61421	1,06069
	10,92146	1,07582
	10,93070	1,08363
	10,94235	1,09947
	10,95148	1,10693
	10,96361	1,12354
	10,97261	1,13062
	10,98526	1,14803
	10,99409	1,15468
	11,00730	1,17295
	11,01593	1,17914
	11,02974	1,19830
	11,03813	1,20398
		1,22408

Полоса 011—030

10,9735	11,1000	11,1980
10,9950	11,1070	11,2035
11,0165	11,1235	11,2235
11,0300	11,1315	11,2295
11,0385	11,1485	11,2495
11,0535	11,1555	11,2545
11,0610	11,1736	11,2770
11,0760	11,1790	11,2805
11,0850		

Продолжение табл. 34.2

Полоса **012—111**

10,53907	1	10,5639	Il	10,60362
10,54173		10,58112		10,60885
10,55455	1		Il	

Полоса **101—200**

10,51027
10,54271

Полоса?

13,144	14,16	17,029
13,154	14,19	17,036
13,159	14,21	17,048
13,541	16,586	17,370
13,87	16,597	17,376
14,1	17,023	17,390

Молекула **i^cmQJ**

Полоса **001—020**

8,98770094	9,15508653	9,39730489
8,99496997	9,16569469	9,41181219
9,00240216	9,17649187	9,42653076
9,00999899	9,18747931	9,44146159
9,01776190	9,19865824	9,45660568
9,02569233	9,21002991	9,47196399
9,03379171	9,22159552	9,48753750
9,04206146	9,23931022	9,50332713
9,05050297	9,25136594	9,51933381
9,05911764	9,26361978	9,53555845
9,06790685	9,27607290	9,55200192
9,07687197	9,22872646	9,56866511
9,08601437	9,30158160	9,58554884
9,09533538	9,31463943	9,60265396
9,10483634	9,32790109	9,61998126
9,11451859	9,34136768	9,63753153
9,12438343	9,35504028	
9,13443217	9,36891998	
9,14466611	9,38300783	

Полоса **001-100**

10,10434660	10,23981204	10,50639411
10,11295490	10,25237519	10,52476294
10,12186285	10,26525095	10,54349163
10,13107088	10,27844106	10,56258410
10,14057947	10,29194733	10,58204439
10,15038920	10,30577171	10,60187671
10,16050076	10,38758981	10,62208541
10,17091494	10,40353724	10,64267502
10,18163264	10,41982107	10,66365020
10,19265484	10,43644425	10,68501579
10,20398263	10,45340986	10,70677681
10,21561722	10,47072112	10,72893842
10,22755988	10,48838137	

Молекула ^O^O^

Продолжение табл. 34.2

Полоса **001—020**

9,59239947	9,73558466	
	9,74869533	
9,61125719	9,76211913	
9,62110404	9,77585872	
9,63123346	9,78991669	
9,64164836	9,80429565	
9,65235161	9,85718656	
9,66334607	9,87304135	
9,67463455	9,88923095	
	9,90575779	
9,e		
9,71029210		
9,72278448	9,95738572	

Полоса **001 — 100**

10,58841900	11,04470940	
10,60062644	11,06501204	
10,61310290	11,08562903	
10,62584867	11,10656357	
10,63886409	11,12781897	
10,65214962	11,14939871	
10,66570577	11,17130639	
10,67953319	11,19354572	
10,69363257	11.21612059	
10,70800473	11,23903501	
10,72265056	11.^	
10,73757106	11,5	
10,75276730	11,30985791	
10,76824046	11,33417365	
10,78399183	11,35885125	
10,80002276	11,38389568	
10,81633473	11,40931204	
10,83292931	11,49282306	
10,?	11,50270688	
10,J	11,51287542	
10,f	11,52332884	
10,90216870	11,53406738	
10,92020346	11,54509140	
10,93853242	11,55640135	
10,96658256	11,56799780	
10,98565737	11,57988138	
11,00503495	11,59205288	
11.02471801	11.60451316	

Полоса **001—020**

9,49185112	9,64624766	9,88117435
9,49995782	9,65773242	9,89685583
9,50826101	9,66944390	9,91279050
9,51676274	9,68138381	9,92897965
9,52546505	9,69355383	9,94542451
9,53436995	9,70595561	9,96212632
9,54347943	9,71859080	9,97908626
9,55279546	9,75121048	9,99630549
9,56231997	9,76467517	10,01378513
9,57205489	9,77838035	10,03152628
9,58200213	9,79232753	10,04952999
9,59216355	9,80651821	10,06779729
9,60254101	9,82095385	10,08632916
9,61313635	9,83563588	10,10512655
9,62395138	9,85056572	10,12419038
9,63498789	9,86574476	10,14352152

Молекула **" a Ю a**

Продолжение табл. 34.2

Полоса 001—100

11,329	11,677	11,794
11,346	11,700	11,819
11,364	11,723	11,843
11,382	11,746	**11,868**
11,400	11,770	

*Молекула ^C^Ю^*
Полоса 100—010

	17,596	
16,596	17,639	17,821
16,780	17,684	17,915
16,927	17,730	17,962
16,970	17.775	**18, 010**
17,280		18,053
17,463		

Активная среда NOg [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

Хвак. мкм

11,0

16,63

Активная среда COa [6]. *Условия возбуждения-, в режиме газодинамического лазера*

Хвак. мкм

6,26

11,1

Активная среда NjO. Условия возбуждения: импульсный и непрерывный разряды в смеси N^O, N, *и* He *(соотношение в смеси* 1:3,5:40) *при* P = 1 , 7 к П а ; *оптическая накачка лазером на* HBr (4,465 мкм), *в режиме газодинамического лазера* (9,48 и 10,65 мкм) [6]

Хвак. мкм

Полоса 001—010

9,48

Полоса 001—100

10,3456	10,5602	**10,8000**
10,3532	10,5692	10,8104
10,3609	10,5761	**10,8208**
10,3687	10,5872	10,8312
10,3765	10,5963	10,8418
10,3843	10,6054	10,8523
10,3922	10,6146	10,8629
10,4001		10,8736
10,4081	10,6332	10,8844
10,4161	10,6426	
10,4242	10,65	10,9061
10,4323	10,6614	10,9170
10,4405	10,6710	10,9280
10,4570	**10,6806**	10,9390
10,4653	10,6903	10,9501
10,4737	10,6999	10,9613
10,4821	10,7097	10,9726
10,4906	10,7195	10,9839
10,4991	10,7294	10,9953
10,5077	10,7393	11,0067
10,5163	10,7493	**11,0182**
10,5250	10,7593	11,0298
10,5337	10,7694	11,0415
10,5425	10,7796	
10,5513	10,7898	

*Продолжение табл. 84,^*

Полоса 002-101

10,40331	10,55089	10,80453
10,41107	10,55958	10,81471
10,41889	10,56832	10,82495
10,42676	10,57712	10,83524
10,43468	10,58596	10,84560
10,44265	10,59486	10,85601
10,45067	10,60382	10,86648
10,45874	10,61282	10,87701
10,46686	10,62189	10,88760
10,47503	10,63100	10,89825
10,48325	10,72517	10,90896
10,49157	10,73489	10,91973
10,49985	10,74468	10,93056
10,50823	10,75450	10,94145
15,51666	10,76939	10,95241
10,52513	10,77434	10,96342
10,53367	10,78435	10,97450
10,54225	10,79441	10,98564
		10.99684

Активная среда S^O **[6].** *Условия возбуюодения: в режиме газодинамтеского лазера*

Как, мкм

12,87

20,57

Активная среда OCS. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* OCS *или смесях* OCS « He, OCS м N^, OCS *и* CO, OCS *и* C O + H e ; *оптическая накачка импульсным СОг-лазером*

Полоса 001—100

	8,3654	
,2416	8,3685	8,3999
,2439	8,3715	8,4024
,2518	8,3746	8,4055
,2543	8,3779	8,4065
,2571		8,4117
		8,4146
	3,3870	8,4178
,2645		8,4213
,2673		8,4243
		123,0
19,057		132,0

Активная среда i]. *Условия возбуждения: в реотме амическкюго лазера*

Хвак. мкм

4,76

Активная среда CSa. Условия возбуокдения: в смеси CSj (13 Па) м N2 (250 Па) *с прокачкой рабочей среды; перед смешиванием N3 возбуждается е непрерывном разряде; в поперечном разряде при атмосферном давлении с предыонизацией электронным пучком*

Аияк. мкм

11,482	11,510	**11,531**
11,489	11,517	**11,538**
11,596	11,524	**11,545**
11,503		

Молекула i®C®S2

11,960	**11**	**11,986**	**11**	**12,241**
11,965	II	**12,217**	II	**12,249**

Активная среда HCO [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

Хвак, мкм
7,15
16,1

'Активная среда DCO [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

Хвак> мкм
9,92

Активная среда FCO [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

Хваи, мкм
8,15
11,90

Активная среда COS [6]. *Условия возбуждения', в режиме газодинамического лазера*

Хваь, мкм
6,43
8,24

Активная среда HCN. *Условия возбуждения: импульсный разряд в различных газовых смесях, к примеру CH4 и* **NH3, CH4** *и* **N^;** *многие линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера* (3,69, 7,19, 7,63 мкм) [6]

мкм

3,69	116,132	284,0
7,19	126,164	**309,7140**
7,63	128,629	**310,8870**
81,554	130,838	335,1831
96,401	134,932	**336,5578**
98,693	138,768	372,5283
101,257	165,150	538,2
110,240	201,059	545,4
112,066	211,001	676,0
113,311	222,949	773,5

Активная среда DCN. Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси D^ *и* BrCN *или* CD4 *и* ND3; *некоторые линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера* (4,31 и 12,62 мкм) [6]

4,31	189,9490	194,7644
12,62	190,0080	204,3872
181,789	194,7027	

Активная среда HNC [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

Хвак' мкм
6, 68

Активная среда FCN [6]. *Условия возбуждения: в реотме газодинамического лазера*

Хвак! МКМ
8,25

Активная среда ClCN [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

Хвак. МКМ
5.44
6,81

Активная среда BrCN [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

Хвак, мкм
5,38
6,16

Активная среда ICN [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

Хвак, МКМ
5,93
6.45

Активная среда NHj [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

Хвак, мкм
15,4

Активная среда NFj **[6].** *Условия возбуждения: в реотме газодинамического лазера*

25,4

Активная среда FNO [6]. *Условия возбужсОения: в режиме газодинамического лазера*

Хвак. мкм
9,28

Активная среда ClNO [6]. *Условия возбуждения: режиме газодинамического лазера*

S,24

Активная среда BrNO [6]. *Условия возбуждения: в режим газодинамического лазера*

Авак, мкм
6,52

Активная среда HgO. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах HgO *при* P = 504-130 Па; *некоторые линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера* (4,19 и 4,57 мкм) [6]

Хвак, мкм

2,28	4,77	7,287
4,19	7,095	7,299
4,57	7,206	7,392

7,427	32,924	49,430
7,459	33,308	53,910
7,545	33,329	55,000
7,567	34,60	55,088
7,592	35,017	56,129
7,709	35,383	57,659
7,711	35,833	**57.799**
7,712	36,606	**66.800**
7,742	37,848	66,903
9,4773	38,086	67,169
9,570	39,695	72,856
11,83	40,45	73,401
11,96	40,638	78,443329
16,932	42,51	79,091010
23,13	45,517	85,564
23,365	45,91	86,301
24,966	47,244	86,471
25,162	47,39	87,323
26,595	47,468	87,469
26,660	47,687	89,772
27,970755	48,19	115,32
28,054	48,366	**118,59104**
28,270	48,676	**120,08**
28,295	48,765	220,280
28,356	49,06	**350,20**
28,451		

l

Активная среда D-O. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Dfi при* P = 27-l'-130 Па; *некоторые линии возбуждаются также непрерывно; оптическая накачка излучением CO^-лазера*

Хвак, мкм

26,36	I	56,830	I	103,33
33,896		61,182		107,72019
35,081		71,944		**107,91**
36,096		72,427		**108,88**
36,324		72,747780		110,49
36,526		73,337		111,74
37,788		74,341		170,08
37,864		74,526		171,67
39,53		76,305		239
40,994		78,16		263
41,79		83,730		276
48,80		84,111		**358,5**
50,71		84,278897		**385**
54,73		99,00		

Активная среда SOj. Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси SOg (50 Па) *и* Не (500 Па); *некоторые линии возбуждаются также непрерывно: в режиме газодинамического лазера* (3,76 и 4,96 мкм) [6]

3,76	141,06	151,35
4,96	142,00	192,80
139,83	149,94	206,53
140,82	151,08	215,27

Активная среда H^S. Условия возбуждения: импульсный разряд в HgS *при* P = 20 Па; *в режиме газодинамического лазера* (6,58 и 6,63 мкм) [6]

мкм

6,58	52,307	73,54
6,®5	55,612	81,45
33,30	60,224	83,45
37,6000	61,413	87,580
48,70	**62,6**	92,0

96,4	126,2	Il	140,8
103,3	129,1		162,4
108,8	130,60		192,9
116,8	135,3	P	225,3

Активная среда D^S [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

Ksjx, мкм

9,19

9,31

Активная среда BFj [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

Хвак. мкм

11,92

26,35

Активная среда BCl3. *Условия возбуждения: непрерывный режим при добавлении паров* BCl3 *к газовой смеси CO^-лазера*

Хвозд, мкм

18,3	Il	19,4	Il	22,4
18,8		20,2		23,0
19,1	I	20,6	Il	

Активная среда $SF_,$. *Условия возбуждения: импульсное возбуждение при двухфотонном поглощении излучения CO^-лазера* (10,6 мкм)

^возд» мкм

15,9005

Активная среда NHg. *Условия возбуждения: импульсный разряд с высокой плотностью тока в NH3 при P = 70—* 130 Па; *оптическая накачка лазерами на* NjO, COg, HP

мкм

6,27	12,316	25,4744
6,69	12,348	25,8839
9,3	12,520	26,1046
9.6	12,526	26,4416
9.7	12,541	26,7068
9,9	12,566	27,8437
10,2	12,591	34,2248
10.5	12,631	35,1573
10.6	12,689	35,5011
10,7	12,8115	36,02
11,0	**12,812**	36,1686
11,446	12,851	49,0356
11,459	12,876	54,45
11,526	12,921	56,8631
11,5547	13,031	58,01
11,721	13,114	63,25
11,80	13,124	64.5
11,811	13,145	64,7274
11,994	13,176	67,19
12,010	13,269	67,24
12,078	13,218	72.6
12,0791	13,331	72,76
12,1143	13,411	74,15
12,1558	13,576	78,28
12,1846	13,7261	81,53
12,245	13,821	83,60
12,251	15,8782	83,85
12,266	15,9452	84,64
12,280	18,9250	87,1
	19,5497	88,05

88.20	151,5	290,4
88,90	155,17	290,9
90,50	155,28	291,2
90,93	216,44	291,35
92,87	223,91	291,95
112,98	225,39	301,2
114,29	225,07	306.28
119,02	256,61	311,75
147,04	263,43	388
147,2	280,5	404,89
147,15	281,35	
151,49	281.48	

Молекула «NH3

14,3	**16,0**	375,9
14.6	17,8	218,9
15,2	89,68	111,9
15.7		

Активная среда PH3. *Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением CO^-лазера*

Хвозд. мкм		
77,58	116,88	166,73
83,77	117,01	166,79
89,76	121,45	166,84
89,80	129,78	166,87
90,26	129,98	180,54
97,19	130,14	182
97,30	135,95	186,25
102,62	136,71	187,56
104,4	140,85	194,47
106.04	145,88	194,70
106.05	146,07	194,89
106,09	146,34	195,18
106,23	155,07	223,07
109,7	156,34	

Активная среда N0C1. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера*

Хвозд. мк:		
16,4	]6,69	**16,86**
16,52	16,7	16,9
16,57	16,75	

Активная среда CF4. *Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением CO^-лазера*

15,33	15,74	**16,12**
15,41	15.76	16,18
15.49	15.77	**16,20**
15.50	15.84	16,24
15.55	15.85	16,26
15.56	15,91	16,27
15,58	15,94	16,31
15.60	16,00	16,35
15.61	16,03	16,40
15.62	16,07	
15,70	**16,10**	

Активная среда CFgBr. *Условия возбуждения: оптическая накачка CO^-лазера*

мкм	
885,2	

Активная среда CF3I. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера*

^возд, мкм	
13,57	
13,63	

Активная среда CgHa. Условия возбуждения: импульсное возбуждение смеси C2H2, Na и Не с *прокачкой рабочей среды; оптическая накачка излучением CO^-лазера*

Хвак, мкм		
8,0334	17,45	19,03
8,0340	17,61	19,13
8,0347	17,77	19,21
8,0356	18,67	19,27
8,0380	18,79	19,67
8,0409	18,85	20,01
8,0442	18,96	20,44

Активная среда C2H4. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера

Хвозд, мкм
10,53
10,98

Активная среда HgCO. *Условия возбуждения: импульсный разряд при* P = 7-ь50 Па; *оптическая накачка излучением CO^-лазера*

Хвак, мкм		
101,9	155,1	163,8
119,6	157,6	170,2
122,8	159,5	184,4
125,9		

HDCO
195
196

D2CO	
233	733,5739
245	752,6807
279	

Активная среда (H2CO)з. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера

Хвак, мкм		
384		815
433		
460	712	
512	750	948,9247
619		

Активная среда HCOOH. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера*

Хвак. мкм		
229,39	336	401
254,80	336,3	403
278,61	342,74	**404,1**
302,08	359,81	**405,5848**
302,2781	368	405,75
309,23	388	406
311,45	392	413
319,48	393,6311	414
334,82	394,2	418,51
334,91	396	418,6

419,55	446,75	533,6773
420	446,8730	534,'5
420,26	447	534,,8
421	447,58	677
428	458,43	580,3872
432,1093	458,5229	580.52
432,6313	458,6	582
432,6325	460,51	669,5308
433,10	4S2	670
435	493,28	742,5723
437,7	496	743
438	512,88	744,0503
44]	513,2	745
445,21	515,1690	761
445,81	518,83	785
445,8971	530	**786,1617**
446,5054		

HCOOD

462
925

DCOOD

305	j_1	$I^и$	790
349		526	937
381	i	569	

пивная среда CH2F2. Условия возбуждения: оптическая накс1Чка излучением CO^-лазера', непрерывный режим генерации

Хвозд. мкм		
95,5	193,9	355,2
105,5	194,5	381,8
109,3	202,5	382,9
117,7	214,5	394,7
121,7	227,6	418,1
122,4	230,1	432,4
122,4	235,7	434,9
134,0	236,5	464,5
135,3	255,9	503,6
158,5	261,7	511,3
158,9	270,0	540,8
165,8	272,2	567,5
165,9	287,7	588; 1
166,6	289,4	642,5
166,6	293,9	657,2
184,3	298,2	725,1
191,8	326,5	1448,1

Активная среда CH2Cl2. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением OO^-лазера. Непрерывный режим генерации

Хвак мкм		
249	342	631
254		
	520	

Активная среда CHgF. ***Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением CO^-лазера; линии*** с X 496 мкм ***возбуждаются и в непрерывном режиме***

9,75	196,0	251,91
190,3	199,14	372,68
192,78	200,3	397,51
195,0	215,3	419

451,903	496,072	541,147.
451,924	496,1009	595
494	541,113	1221,79

Активная среда **CH3Cl.** ***Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера***

Хвак, мкм		
227,15	275,09	397,6
236,25		461,20
240,98	286,79	511,90
250,4	307,65	568,81
254	333,96	870,80
261,03	349,34	943,97
271,29	354	
273,7	364,5	
275,00	378,57	1886,87

CD3Cl

224	318	519,30
	383,28	698,55
246	443,26	735,12
249	449,79	
	464,76	1239,47
	480,31	1990,75
291,27		

Активная среда CH3Br. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера

Хвозд. мкм		
245,04	407,72	658,53
264,05	414,98	660,70
279,81	418,31	715,40
294,28	422,78	749,29
311,07	508,48	749,36
311,10	531,06	831,13
311,20	545,21	925,52
311,21	545,39	990,15
332,86	564,68	1310,38
333,15	585,72	1572,64
352,75	631,93	1965.34
380,02	632,00	

Активная среда **CH3I.** ***Условия воз накачка излучением*** C

Хвак, мкм		
377,45	508,37	583,87
390,53	517,33	639,73
392,48	525,32	670,99
447,1424	529,28	719,30
457,25	542,99	964
459,18	576,17	1063,29
477,87	578,90	1253,738

CD3I

272	569,4773	734,2624
301	599,5499	745
390	614,1098	788,48
433,1038	640	895
444,3862	644	918,6101
460,5619	660,5822	953,8799
487,2260	667,2322	981,7094
490,3909	670,0940	1005,3476
523,4061	670,1143	1099,5441
540	691,1292	1549,5048
556,8755	730,3234	

Продолжение табл. 34.2

Активная среда **CH3OH.** *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера; непрерывный режим генерации*

^вак. мкм		
37.5	164,5076	251,56
40.2	164,77	253.6
42,18	164,7832	254.1
4.4,4	170,57638	263.7
43.47	171,3	264,6
55,39	185,5	267,4432
58,1	186.03	278.8
60,25	190,3209	280,96
65,1	191,2	290,62
65.6	191.57	292.2
69,70	191.58	292.5
70,511716	191,63	293,78
73,30	193.2	301,9943
77,92	194,01	369,11368
80.3	198.8	386,20
80,6	202.4	390,1
85.59	205.3	392,06871
92.60	206.9	416,5224
92,69	209,89	417.8
96,522394	211,25	451.9
97.48	214,35	469,02330
117,95	218,22	470
118,83409	223.5	471
129,5497	232,85	486,1
133,1196	232,93906	570,56864
151,35	237.6	603.06
	242,4727	614,92
	242,79	627,34
163,03353	246	694,17
163,9	250,78129	695
164	251,13983	699,42258
164,3		

WCH3OH

85,31729	149,27226	268,57203
86,11179	152,07568	280,21826
103,48081	157,92848	280,23974
115,82324	203,63578	332,6033
118,01314	208,41205	338,9737
146,09739	238,52268	461,3848
148,59041		

CD3OH

34,8	179	277
37,6	182,4	**278**
40,1	184	
41,5	191,9	
41.8	**201**	287,4
43.9	219,9	290,0
49.8	**222**	297
52.9	223	299
60,8	232	309
71.0	236	310
76.1	238,3	321
82,1	253,2	336
86.4	258,7	346
102,6	**266**	350
112,3	**266,2**	351
128,7		352
144,0		353
158	276	370

Продолжение табл. 34.2

	483	
	495	702
	498	703
407	**508**	711
409	517	722
410	551	745
412	553	760
419	554	774
421	583	
422		
435		1100
455		1146
472		1290
	685	

CH3OD

46,7	134	225
57	134.7	229,1
	134.8	238
70^3	136	294,81097
100,8	145,66171	305,72610
104	212,8	330,1
110	215,37244	417,1
117		

CD3OD

35	184	312
41	229	354
78	255	406
119	312	414
150	339	495
165	299	869

CH2DOH

109	238	322
125	250	364
151	272	374
164	295	396
167	296	468
171	308	616
207		

CHD2OH

165	11	260	1	426
168		346		483
179		355		513
238	1	363		

Активная среда **CH3CN.** *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера; непрерывный режим генерации*

Хвак. мкм		
	427,04	704,53
281,96	430,55	713,72
	441,15	741,62
303,54	453,41	854,41
346,32	466,25	1014,89
372,87	480,01	1016,33
380,71	494,74	1086,89
386,41	510,16	1146,83
387,31	561,41	1351,78
388,39	652,68	1814,37
422,14		

Продолжение табл. 34.2

Активная среда* CH_3NC. *Условия возбуждения-, оптическая накачка излучением CO^-изера; непрерывный режим генерации

ХвозД, мкм-

Активная среда* CH_3CCH. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера

X.,n,,,, мкм

427,89	563,13	675,29
428,87	566,04	757,41
	583,77	798,55
516,77	647,89	1097,11
531,08		1174,87

Активная среда CH3NH2. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера

^возд» мкм

99,5	159	201
104	164	208
115,5	166	218
118	168	219
126	176	243
134	175	251
139	177	267
141	180	268
143	183	288
147	194	314
148,5	198	347
153		

Активная среда CHaCFj. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера

мкм

375!O	554,4	
415	568	
		990
		1020

Активная среда C2HgOa. Условия воздуждения: импульсная оптическая накачка излучением CO^-лазера

Хвозд, мкм

62,5	132	250
69,1	135	252
70,1	164	262
75,2	169	277
77,4	171	288
90,8	185	290
95,8	189	299
109,1	192	344
117,1	[97	358
118	200	388
118,9	231	415
125,8	240	696

Активная среда* CH_2CH_2F. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера', непрерывный режим генерации

^вак» мкм

206,6	376	519
217,1	378	540,9
226,9	404	593,3!
264,7	405	620,4
282,3	405,50	**851,9**
330,2	462,92	**1013**
336,7	486	1069
362,1	502,2	1546

Продолокение табл. 34.3

Активная среда CH3CHF2. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера; непрерывный режим генерации

Хвак, мкм

458	Ⅱ	533
464	I	755

Активная среда* CH_3CF_3. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера; непрерывный режим генерации

Хвак, мкм

379

Активная среда CjHsCl. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера: непрерывный режим генерации

900	1400
1350	1720

Активная среда C2H6OH. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера; непрерывный режим генерации

Активная среда C2H3Cl. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера; непрерывный режим генерации

ХВАК. МКМ

368	532	699
424	538	707
445	574	828
467	603	935
507,7	634,4	995
519	638	1041

Активная среда C2H3Br. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением CO^-лазера', непрерывный режим генерации

^ВОЗД' мкм

283	528,49	784,26
356	553,69	826,94
370	594,72	853,43
396	618,44	900,13
411	624,09	943,22
416	635,35	936,15
419	646	963,48
424	649,42	985,85
427	680,54	989,19
438,5	693,13	990,63
443,5	707,22	1247,59
445	712	1383,88
482,96	724,13	1394,06
490,08	741,11	1614,88
506	780,13	

Продолокение табл. 34.3

Ативная среда QHsCN. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением СО^-лазера; непрерывный режим генерации

Хвоэд. мкм		
270,6	**586**	793
	623	**828**
	631	910
	722	940
574,4	738	1156
578	775	1184
584		

Активная среда СНзСЮНд. Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением СО^-лазера

Хвозд. мкм	
375	495
	520

Активная среда С3Н2О. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением СО^-лазера; непрерывный режим генерации

Хвозд. мкм		
148	И	336
156	▌	516

Активная среда СЮа. Условия возбуждения: оптическая накачка излучением СО^-лазера; непрерывный режим генерации

^возд> мкм	
	204
	216

Активная среда HCCF. ***Условия возбуждения: оптическая накачка излучением СО^-лазера; непрерывный режим генерации***

Хвозд. мкм
509

Актинная среда FCN. ***Условия возбуждения: оптическая накачка излучением СО^-лазера; непрерывный режим генерации***

Хвозд, мкм

34.3. ЛАЗЕРЫ НА ПРИМЕСНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Активным веществом лазеров на примесных кристаллах служат ионы элементов переходных групп, внедренные в кристаллическую матрицу. Возбуждение иоиов-актн1заторов осуществляется оптически, чаще всего с помощью газоразрядных импульсных ламп или ламп непрерывного действия. Энергетические уровни ионов-активаторов отличаются от уровней свободных ионов из-за взаимодействия с кристаллической матрицей, которое приводит к расщеплению и ушпрению электронных уровней иона, а также к образованию у них в ряде случаев колебательной структуры (рис. 34.10, 34.11). Наибольшее воздействие испытывают уровни, соответствующие внешним электронам иоиов, так как внутренние электроны экранируются внешними оболочками.

Подавляющее число лазеров на примесных кристаллах генерирует излучение на чнсто электронных переходах. Интерес к лазерам на электронно-колебательных переходах (рис. 34.11) связан в основном с возможностью перестройки длины волны излучения.

Одни и те же ионы-активаторы в зависимости от гипа кристалла, в который они внедрены, образуют системы с различными генерационными параметрами. Большое влияние при этом оказывает температура активной среды, в зависимости от которой меняются радиационные параметры и спектр поглощения ионов-активаторов в кристалле.

Как правило, кристаллы до внедрения в них ионов-активаторов прозрачны на длине волны накачки, однако в ряде случаев в кристалл кроме ионов-активаторов вводятся также ионы-сенсибилизаторы, роль которых сводится к поглощению энергии накачки и передаче ее лазерному иону, что повышает эффективность лазера.

Из большого числа (более 270) существующих диэлектрических лазерных кристаллов наибольшее распространение получили кристаллы YЗAlЗO12 (ИАГ — иттрий-алюминиевый гранат), YAlOз (перовскит) с примесью ионов Nd®+, а также **Al2O3**—Cr3+ (рубни). Замечательной особенностью этих соединений является удачное сочетание удовлетворительных спектрально-генерационных свойств с рядом таких необходимых качеств, как высокая механическая прочность, твердость, значительная теплопроводность и прозрачность в широком спектральном интервале. Повышение эффективности кристаллических лазеров на ионах по сравнению с лазерами на ИАГ достигнуто за счет сенсибилизации лазерного кристалла ионами Cr'+, обладающими широкими полосами поглощения в видимой области. Передача возбуждения от иоиов Cr®+ на верхний лазерный уровень Nd®+ (рис. 34.10) происходит путем широкополосной люминесценции, связанной с электронно-колебательным переходом (рис. 34.11).

Эффективность передачи возбуждения из низколежащего возбужденного состояния Cr®+ на Ч2 определяется энергетическим зазором между этими состояниями, который сильно зависит от вида кристаллического поля. Это позволяет получить высокую эффективность передачи возбуждения от ионов Cr3+ к ионам Nd3+ в кристалле гадолиний-скандий-галлиевого граната (ГСГГ) и, в конечном счете, достичь КПД лазера на ГСГГ — Nd3+ 4,5%, что в 2,4 раза выше КПД лазера на ИАГ — Nd'+ в аналогичных условиях [11]

На электронно-колебательном переходе хрома — Мг осуществлены также перестраиваемые по длине волны кристаллические лазеры, работающие при ***T—20''C.*** Такие лазеры созданы на основе кристаллов александрита (BeAl204) [12], а также на основе уже упоминавшихся кристаллов ГСГГ [13]. Диапазон перестройки составляет 730—800 нм для александрита и 766—820 нм для ГСГГ при полном КПД 2%.

В табл. 34.3 представлены длины волн и рабочие температуры генерации лазерных диэлектрических кристаллических систем. Лазерные системы разделены по активаторным (лазерным) нонам. Кристаллические матрицы перечисляются в алфавитном порядке. Если в кристалл добавляется сенсибилизатор, то обозначение соответствующего нона и его концентрация указываются в первой колонку через двоеточие при условии, что концентрация сенсибилизатора близка к содержанию активатора. Иногда сенсибилизирующее действие оказывают ноны, входящие в структуру самой матрицы-основы. Например, формула кристалла LiYF4, содержащего примерно равные доли Y и Er, в таблице записана

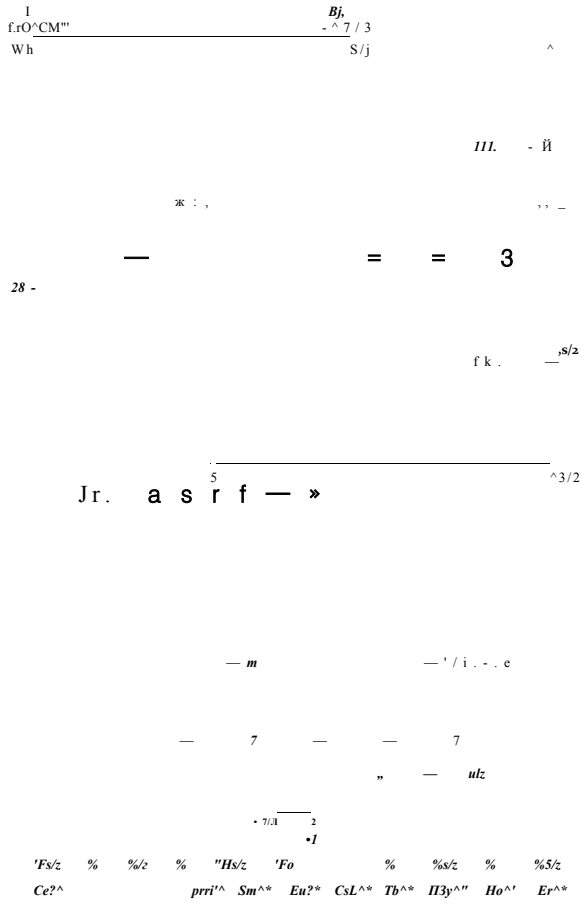


Рис. SWO. Энергетические состояния редкоземельных (TR3+) нонов в кристаллах [10]

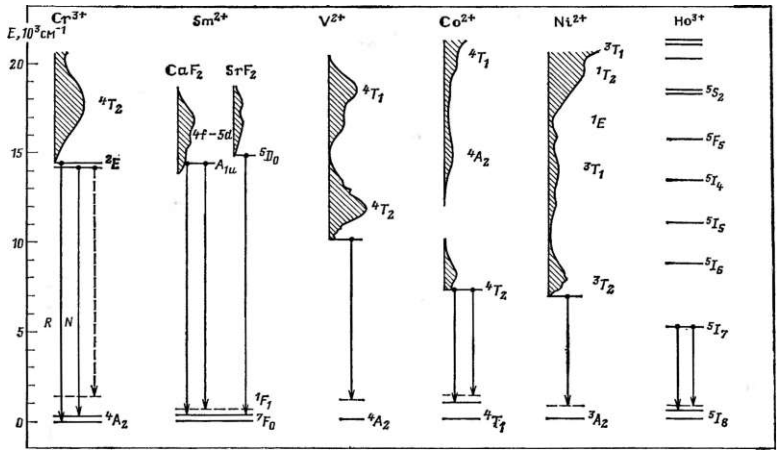


Рис. 34.11. Упрощенные рабочие схемы кристаллических лазеров, генерирующих на электронных и электронно-колебательных переходах [10]

так: Li(Y, Er) Fi. Возможен также более сложный случай, например Li(Y, Er) F4: TuS+. Здесь содержание ионов Ти®+ (второго сенсибилизатора) невелико и приблизительно соответствует концентрации активаторных ионов. Может быть указано как массовое, так и атомное содержание сенсибилизирующей примеси, причем указанное значение может относиться как к исходной шихте, так и к кристаллу. Для уточнения следует обратиться к оригинальным работам.

Более подробные сведения о лазерах на диэлектрических кристаллах, а также о физических и механических свойствах лазерных кристаллических матриц можно найти в монографии [14], а также в обзорах [10, 12].

Таблица 34.3. Длины генерации лазерных диэлектрических кристаллических систем [10]

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Темпера^ра,
	Группа железа		
	Хром (Cr3+, 3rf3)		
A1,O3		0,6943 0,6934	300 77
		0,6929	290
BeA1,04	[12]	0,73—0,8	300
GdgSc^GaaOia	[13]	0,766—0,82	300
Cr--	*'E (E)* M, **(G3+ c:r3+)*1**	0,6934089 0,6934255 0,7009 (JV2) 0,7041 *(Ni)*	- 7 0 - 7 0 77 77
YsAbQi,		0.6874	300

Продолжение табл. 34.3

		Лазерный переход		
MgF,			I 1,1213	
		Железо (F^, 3d®)		
n-InP	I	[15]	I 3,53	
		Кобальт (Co2+, 3d')		
	«Г,	***^T,***		77
KZnFs P6]			1,65—2,07	**80—200**
MgFg	«Га	***^T^***	1,750	77
				77
			1,99	77
			2,05	77
			2,165	77
		Яккель (Ni^, 3d8)		
	—	[17]	1,591	77
			1,623	77
			,636	77
			674—1,676	85
			731—1,756	85
			785—1,797	198-240
MgO		Ma	3144	77
			915	77
				77
				20
		Двухвалентные ионы редкоземельных элементов		
		Самарий (Sm^+j 4/»)		
Cap,	5d - 'Fj		0,7085	
			0,708	65—90
			0,720	>65
			0,729	>65
				4,2
		Диспрозий (Dy®"', 4P®)		
CaPв	-		2,36	
SiF,			2,35867	
			2,3659	
		Тулий 4/u)		
Cap,	^F,,,	«Л		
		Трехвалентные ионы редкоземельных элементов		
		Церий (Ce3+, 4/i)		
	5d-^4/	[18]	-0,285	
	Ы-^Af	[19]	0,309-0,325	

Продолокение табл. 36.5

	Лазерный переход	
	Празеодим (Prs+, 4/^)	
		1,04
		1,0468
LaBr,		0,532
		0,621
		0,632
		0,647
		0,5985
		0,4892
		0,6164
		0,619
		0,6452
LiYFe		0,479
		0,5378
		0,6071
		0,6395
		0,6954
		0,7190
PrBrз	***^Po*** «Я,	0,622
		0,649
PrCls		0,469
		0,531
		0,617
	^Po "П.	0,620
		0,647
	122}	0,5980
&M0O4		1,04
УАЮз'		0,6139
	^pW^Ft	0,7195
	Неодим (Nd3+, 4/')	
Bao.75Cao.25NbA		1,062
BaPr		1,060
BaF,-LaF3		1,534
		1,0538
		1,0580
		1,054
		1,3185
		1,3280
		1,3290
BaPa - CePз	$Ч_{11/2}$	1,054
BaP,-CPз	***'n/2***	1,0526
BaP,-УPз		1,0521
		1,32
Ba,MgGe,0,		1,0544

Продолжение табл. 34.3

кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура,
		1,0615	**300**
Ba^NaNbsOis (II *c)*		**1,0613**	**300**
Ba^ZnGeA *(|| c)*		**1,0544**	**300**
Bi^**GejO„**		**1,06425**	**77**
		1,0644	**300**
		1,3418	**300**
CaAuO,		**1,0786**	**300**
		1,05895	**77**
		1,0oooo	
		1,07655	**77**
		1,0772	**—**
		1,3420	**300**
		1,3710	–
		1,3400	*77*
		1,3675	**—**
CaAUA,	/2	**1,0497**	**300**
CaF,	/2	**1,0457**	**77**
Caf, **(I)**		**1,0461**	**300**
		1,0457	**50**
		1,0467	–
		1,0448	**50**
		1,0508	
		1,0650	**50**
		1,0481	–
		1,0448	**120**
		1,0661	
CaFs **(II)**		**1,0885**	**300**
CaFz-CeFg		**1,0654**	**300**
		1,3185	**300**
CaF^-GdFs		**1,0654**	**300**
	^^3/2-^/13/2	**1,3185**	**300**
CaFs - CeOr		**1,0885**	**300**
CaFg-LaFs		**1,0645**	**300**
	^^3/2 – ^^13/2	**1,3190**	**300**
CaFa-SrFj		**1,0369**	**300**
CaFa — SrFa — BaF^ — YF3 — LaFg		**1,0535**	**300**
CaF,-YF3		**1,0461**	**300**
		1,0540	**300**
		1,0632	–
		1.3255	**77**
		1,3380	–
		1,3600	**77**

Продолокение табл. 34.3

Кристалл		Длина волны генерации, мкм	Температура, К
		1,3270	300
		1,3370	300
		1,3585	—
CaPэ - YFs — NdFg		1,0632	300
Ca^La (P04)эO		1,0613	300
CaLa4(Si04)3 0		1,0610	300
CaGdi (Si04)3 0		-1,06	300
Ca (ЫЬОэ)2		1,06	77
		1,0612	—
		1,0615	300
CaMo04	^^3/2-^/11/2	1,061	300
		1,067	–
Ca (P04)э F (l1 a)	^/^3/2-^/11/2	1,0630	300
Ca(ro4)3F(|lc)	**^/^3/2-^/13/2**	1,3347	300
		1,3345	77
ca (NbOgb	**^/^3/2-4/13/2**	1,3380	300
		1,3425	—
CaSc,04		1,0720	300
		1,0755	—
		1,0868	300
		1,0730	77
		1,0867	—
		1,3565	300
		1,3870	77
Саэ(У04)2	'/^3/2-^/.1/2	1,067	300
CaW04	^^3/2-^/9/2	0,9145	77
CaW04 (Na+)	^/^3/2-^/11/2	1,0582	300
		1,0652	–
		1,0649	77
CaW04 (Nb6+)	^/^3/2-^/11/2	1,0587	77
		1,0601	–
		1,0649	77
		1,0650	–
		1,0634	77
CaWOi *(* II *c,* Na+)	^/^3/2-^/13/2	1,3340	300
		1,3475	–
		1,3310	300
		1,3459	—
CaW04 (X *c,* Na+)	**^^3/2 - ^/13/2**	1,3370	300
		1,3390	—
		1,3345	77
		1,3372	—
		1,3880	*77*

Продолжение табл. 34.3

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, K
Ca^YsF,,		1,0498	300
		1,3200	77
		1,3190	300
		1,3525	—
CaYaMfeGegOia		1,05896	300
CaY4 (8IO4)3O		1,0672	300
CdFs-CaF^ [24]	'Л 1/2	1,0495	300
CdPa - YFs		1,0651	300
		1,3245	300
CeCl3 (II c)		1,0647	300
CeFs		1,0410	77
		1,0638	90
		1,0404	300
		1,0639	–
		1,3320	300
		1,3240	77
		1,3310	77
		1,3675	–
CePб014	^ / ^ 3 / 2 / 2	1,051	300
GdAIOs		1,0760	300
GdCasO,,		1,0621	300
		1,0584	77
		1,0599	
		1,3307	—
		1,3315	
Gd (Mo04)3		-1,06	135
		1,0701	300
		1,0606	–
GdOs		1,0789	300
		1,0741	
		1,0789	77
		1,0776	–
GdPA4		1,051	300
GdScOs		1,08515	300
GdsSc^AlgOia		1,05995	300
		1,05915	77
		1,0620	300
		1,0660	
H[0,-У,0з		1,0604	300
KsBi (Mo04)4		1,0660	300
KGd (W04)2 (II [010])		1,0672	300
KLa (MoO^h	'/^3/2-^/11/2	1,0585	77
		1,0587	300

Продолжение табл. 36.5

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура. К
KLu (W04)2 [25]		1,0714	300
		1,3482	300
KY (MoO_4).		1,0669	300
KY (Mo04)2 (11 a)		1,3485	300
KY (W04)2	'^3/2 - '/9/2	0,9137	77
		1,0688	300
		1,3525	300
		1,3545	
		1,3515	77
KeNdLi^fio [26]	'/^3/2-'/.1/2	1,048	77
		1,052	300
KNdP^Oia	^/^3/2-^/.1/2	1,052	300
K3Nd(P04)2	'/^3/2 - '/../2	1,06	300
K3(NdLa)(P04)2	'/^3/2 -'/.1/2	1,06	300
KsNd (Mo04)4		1,0660	300
baAlOз	'/^3/2-'/.1/2	1,0804	300
La,Be,05 (|| b)		1,0698	300
La^Be^Osdl X)	'/^3/2-^/.1/2	1,079	300
ba^Be^***Oв (U b)***	'/^3/2-'/.3/2	1,3510	300
LaFs'		1,0407	300
		1,0633	–
		1,0403	77
LaFa (cf == 20°)	'/^3/2 – '/l3/2	1,3675	300
		1,3235	77
		1,3670	
LaFs ***(cF*** w 73°)	'f3/2-'/13/2	1,3310	300
		1,3125	77
		1,3305	
LaFg-SrFa	'/^3/2 -'/../2	1,0486	300
	'f3/2-'/l3/2	1,0635	
		1,3315	300
LasGasSiO,^ [27]	'/^3/2-'/.1/2	1,0640	300
		1,0670	
		1,0675	77
	'/^3/2-'/.3/2	1,3730	300
LaNb04	'f3/2-'/l./2	1,0624	300
La^Os	'f3/2-'/1./2	1,079	77
La^O^S	'/^3/2-'/../2	1,075	300
LaMgAluOis [28]	'/^3/2-'/../2	1,0552	300
		1,0817	–
	'/^3/2 – '/.3/2	1,3760	300
LiGd (MoO_4). (II ***c)***	'/^3/2-'/11/2	1,0599	300

Продолжение табл. 34.3

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура. К
LiLa (Mo04)2 (II *c)*		1,0585	300
		1,0658	77
		1,3370	300
		1,3375	77
Ш Ь О з (x *c)*		1,0846	300
11KIO3 *(*11 *c)*		1,0933	300
LiNbOg (II *c)*		1,3870	300
LiNbOs (J. *c)*		1,3745	300
L i N d P A 4 | i ° >		1,0477	300
Li (Nd, La) PaOig		1,0477	300
Li (Nd, Gd) P^Oia		1,0477	300
LiYF4		1,0530	300
		1,047	
LuAlOs (11 [1121)		1,0671	77
		1,0831	120
		1,0675	300
		1,0759	300
		1,0832	
		1,3437	300
LusAlAa		0,9473	77
		1,06425	300
		1,0605	77
	'^3/2-^/13/2	1,3382	300
		1,3532	—
		1,3525	77
LuScOs	^^3/2-^/11/2	1,0785	300
LugGaAs	^/^3/2-^/11/2	1,0609	300
		1,0623	300
		1,0587	77
		1 06025	
		1,0616	77
	^/^3/2-^/.3/2	1,3315	300
Lu3Sc,Al30,3		1,0599	300
		1,0591	77
	'/^3/2-^/13/2	1,3360	300
a-NaCaCeFg		1,0653	300
		1,3190	300
a-NaCaYFe		1,0539	300
		1,069	–
	^/^3/2-^/13/2	1,3285	300
		1,3375	–
		1,3600	300

Продолжение табл. 34.3

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
5NaF . 9YF3		1,0506	3 »
		1,0595	–
		1,3070	300
Nao.5Gdo.5WO4		1,06	77
NaGdGeOi [29]		1,0615	300
		1,3334	300
NaLa (MoO^)^		1,0595	300
		1,0653	–
ЫаЬа(Мо04)а(Э = 60°)		1,3380	300
		1,3440	300
		1,3380	77
		1,3430	–
NaLa (W04)2 (II *с)*		1,0635	300
		1,3355	300
NaNdP40,2		1,051	300
NagNd (P04)2		1,05	300
Na2Nd2Pb6(P04)gCl2 [30]	^^3/2-^/11/2	1,0585	–
		1,0685	–
NasNd (W04)4		1,063	300
NdAl3 (ВОз)4	'/^3/2-^/11/2	I,0635	300
(Аь_уСГу)з (ВОз)4 [31]	'/^3/2-'/.1/2	1,063	–
(NdLa) P5OJ.4	- '/п/2	1,0511	300
(NdSc) **PbOi4**	^/^3/2-^/11/2	1,051	300
(Ndin) Рб014	'/^3/2 — '/ц/г	1,051	300
PbsGejOu [32]	**'/^3/2-^/11/2**	1,0789	77
		1,0799	300
PbMo04	'/^3/2 — '/ц/г	1,0586	295
PbMo04 *(с)*	'/^3/2 — '/13/2	1,3340	300
		1,3320	77
РЬ5(Р04)зР	'/^3/2-^/11/2	1,0551	300
SrAUO,	'/^3/2-'/11/2	1,0576	300
		I,0828	
		1,0566	77
		1,0568	–
		1,0627	77
	^/^3/2-'/13/2	1,3345	300
		1,3665	–
		1,3320	77
		1,3530	–
	'/^3/2-'/11/2	1,0491	300
SrF,	^/^3/2 - '/11/2	1,037	295
		1,0437	77
		1,044	-

Продолокение табл. 36.5

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, ыкм	Те=пера.у.
SrFa-CeFs		1,0590	300
		1,3255	300
SrFa-GdFs		1,0528	300
		1,3260	300
		1,3250	77
SrFa-CeFg-GdFs	^/^3/2 — ^/Ц/3	1,0589	300
SrFjj – LaPg		1,0597	300
		1,3250	300
SrFs—LuFg	^/^3/2->^/.1/2	1,0556	300
	^/^3/2-^/.3/2	1,3200	300
SrF,-YF3(10<!5)		1,0567	300
SrLa* (Si04)s ©	^/^3/2-^/11/2	1,0586	300
SrF,-YF3	^/^3/2-^/13/2	1,3225	300
		1,3300	
		1,3320	77
SrMo04	^/'з/г-^/ц/з	1,0643	295
		1,0576	295
		1,0640	77
		1,0652	—
		1,059	77
		1,0627	
		1,0611	77
Srs (P04)з F (II c)		1,0585	300
	^/^3/2 -'/.172	1,0493	300
	'/"з/г - '/i3/2	1,3190	300
YAIO3 (II [112])		1,0796	300
		1,0644	300
		1,06405	77
		1,07225	—
		1,0842	300
		1,0913	530
YAIC^ (II c)	'/^3/2-^/13/2	1,3393	300
		1,3413	
YAlOsdlfe)		1,3391	77
		1,3514	—
УА10з:Cr8+ (0,3%)		1,0645	295
		1,0725	300
		1,0795	–
		1,0909	300
		1,0989	—
	'/^3/2-'/13/2	1,3391	300
		1,3411	—

Продолжение табл. 34.3

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
Y3Al5O12		0,891	300
		0,900	–
		0,939	300
		0,946	
		1,0610	77
		1,0612	–
		1,0519	300
		1,0642	—
		1,0613	300
		1,0640	—
		1,0736	300
		1,1119	–
		1,1158	300
		1,1225	–
		1,0615	300
		1,0682	
		1,0779	300
		1,06415	–
		1,3187	300
		1,3335	
		1,319	300
		1,318	–
		1,338	300
		1,358	–
		1,833	233
УзАЬОи : Сгз+ (1о/„)		1,0612	77
		1,0641	300
УзСаАа		1,0633	300
Y2O3		1,073	77
		1,078	77
Y,03-Th02--Nd,03		1,074	300
УзСаАа		1,0589	300
		1,0603	–
		1,06205	300
		1,0583	77
		1,05975	77
		1,0614	–
УР6014		1,0525	300
		1,0515	–
(Y, Lu)3 АЬОи		1,0642	300
		1,0608	77
		1,0636	77
		1,0726	—

Продолжение табл. 36.5

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
YsScsGagOi,		1,0575	77
		1,0583	300
		1,0615	300
		1,3585	300
YSCO3		1,0843	300
		1,0770	77
Y^iOe		1,0715	300
		1,0742	300
		1,0782	
		1,0710	77
		1,0781	—
		1,3585	300
		1,3580	77
YVO4	^^3/2-^/11/2	1,069	-90
		1,0641	300
		1,0664	
		1,3415	77
		1,3425	300
		1,0608	300
	^^3/2-^/13/2	1,3320	300
	Самарий (Sm3+, 4/5)		
ТЬРз [33]	Ч/г-^/^т/г	0,5932	116
	Европий (Eu3+, 4/6)		
	'Do	0,6113	220
YVO4		0.6193	90
	Тербий (Tb3+, 4/8)		
LiYF4:Gd='+ (10%)		0,5445	300
	Диспрозий (Dy3+, 4/9)		
BMY,.26Ero.7)Fg	"/^.3/2-^/^.5/2	3,022	^^
	Гольжш (Но3+, **4/1∞**)		
Ba(Y, YbbFe		0,5515	77
		2,362	77
		2,375	77
		2,363	20
		2,377	
		2,71	2%
		2,065	77
		2,0746	77
		2,0866	
		2,0555	20
		2,074	
BaYb^ [34]		2,0895	300
Bi4Ge30,, [35]	**8/, e/g**	2,087	77

Продолжение табл. 34.3

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм
CaF,		2,092
		0,55122
CaF2:Er3+, Yb3+ (3%), YbFs (3%),		2,1
	Ч, 4s	**2,0600**
CaFa-YFg	*4s*	2,0318
		2.05
CaFa-YF3: (Er3+, Tm3+, Yb3+)		**2.06**
	Ч, ^ 4s	2,0740
CaMoOi : Er8+ (0,75%)		0,0707
		2,0556
Ca (ЫЬОз)2	*Ч, ^ 4s*	2,047
	4J 4I	2,079
g^O.)3F:Cr3MO,30/„)	*4] ^ 4s*	2,046
	4J ^ 4	2.059
CaYi (5Ю4)3О : Ers+ (37,5%) Тт^	*4,-^ 4s*	**2.060**
CdsGasOi, [36]		1,2085
		1,4040
[ErAlO3u)A103		2.1205
ЕгзАЬО^, [34]		2,0010
Er.Oз		2,0985
Ez3|C^A13012 : Tm8+		2,121
(Er, Tm, УЬ)зА1в012		2.085
ЕГ,.5 Yi.sAIsOi,		**2,1010**
		2,0979
		2,0917
		-2.123
GdA103	6/, *4s*	1,9925
HojAlbOia		2.1294
		2,1224
		2,097
	4, 4s	2,090
Hjca^Oi,	*4, -> 4 ;*	2,1135
		2.086
(Ho, Lu)3AUOie [37]		2,1005
		2,1250
		2,1300
H03SC2AI3OI2	*Ч, 4s*	2,1170
		2,1285
	4, 4s	2,0740
		1,3982
KGd(W04)2 1зб]	*4, 4,*	2,9342
KGd(W04)2 (Il *b)*	в/	1,3908
KY(Vo4)' [36j	*4;^ 4 s*	2,0765
		2,0720
KY (W04)2 : Тцз^'		2,0790
	4I^4s	2,0725
Sbbr-'-ialf'	*4, 4s*	2,071
LaNb04 : Er^*		0,5291
LiHoF4		2,0765
LiNb03		0,7498
LiYF.		0,9794
		1,0143
		1,3960
	4'^ 4s	2,0672
	4I	2,1348
LUAIO3	*4, 4s*	2,1020
LusAlBOIS	*4I-^4s*	**2,1020**
LusAisOia : Cr3+ [38]		2,1020
LU3AlBOI2 : Ers+ (2%), Tm3+ (2%)		2,9460
LusAUOi^		

Продолжение табл. 34.3

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура. К
«-NaCaErFe	– *'Is*	2,0345 2,0312 2,0377	150 77
LiYo_5_^_j,Ero_5Tm^HoyF4 [39]	*%* ^ *'Is*	2,06	–
NaLa (MoO4), : YAlO3 [37]	*4 s*	2,050 **2,1185** **2,13**	90 **110** **ПО**
YAlO3 (i| [П2])		**2,9180** '	**300**
Y3Al5Ol,	*Ч,* *Ч,*	2,0132 2,9403 2,0914 2,0975	300 300 77
Y3AI.A2 : Crs+ (0,5%)		2,1223 2,0975 2,1223	**77** **77**
YsAleOi^: Erз+ (50%), Tni3+ (6,7%)		2,0982 2,1227	77
TтзAЬO,, [34]	*Ч* -^ *'Is*	2,1288 2,13 2,0995	295
YsFjol^Erst (5%), Tm3+ (5%)	*4f* ^ ^/3	2,086 2,089 2,107	77 77 77
YsGabO,^	*Ч,* ^ s/g	2,086 **2,114**	77
YV04:Er3+, TmS-o 2Ю,-Er,Oз	*4s*	**2,0412** 2,115	77 77
	Эрбий (EfS-^, 4/")		
BaY^s		0,5540 0,5617	77 77
BaYsFg : Yba+ (37,5%)	- **fn,2*	0,7037 0,6709 0,6700	77 77
BaEr,P3 140]		1,6455 1,7355 1,2320 0,8425 0,8543 1,9975 0,6700	ПО – ПО п о п о п о
	'/11/2 - ^/13/2	2,7417 2,7595 2,7980	п о п о
BaYb^Fs [41]		1,9654	300
Bi^Ge^Oi, [35]	^/^**9/2**-^^/**.3/2** ^•**^3/2** — ^/**13/2** ^/**13/2** ^/**15/2**	1,26 0,853 1,558 1,664	300 77 77
CaAlA	**^/.3/2-^/.5/**	1,5500 1,5815	77

Продолжение табл. 34.3

	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм
		1,617
		1,5298
		0,8456
		0,8548
		1,26
		1,696
		1,715
		1,726
CaFa — ErP$_3$ [42]	'13/2	2,7295
		2,7460
		2,7490
		2,7955
		2,7985
CaP,-ErP$_3$		2,7307
CaPr - ErP$_3$: TmP$_3$ (0,5%)		2,69
CaP,-YP$_3$		0,8430
		1,5448
		1,5558
Ca (Nb03)2	'IS/2	1,61
CaW04		1,612
CdAlOs [43]		1,6571
ErsAlsOia [44]		1,7762
Er$_3$Al$_5$O$^{\wedge}$,		2,9370
ErAlO$_3$ [44]		
(Er, Lu)3**A**$_1$**s**O$_i$2		
Er,.5Lu,.5A103		1,6631
KEr (WOJa [45]		2,8070
KGd (WOih (II *C)*		2,7222
		2,7990
KGd (W04)2 (n b)		2,7990
KGd (WO4). (II ***c)***		0,8468
KGd (W04)2 (II ***b)***		0,8468
KGd (WOih (I! c)		1,7155
KGd ***(WOih*** (II ***b)***		1,7325
KLm-jcEr$^{\wedge}$ (WOt)$^{\wedge}$ [46]		1,7383
		0,85
		2,8092
LaFa		1,6113
LiErPi		1,732
LiErPj [47]		1,7042
		1,2288
		0,8540

Продолжение табл. 34.3

	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм
		2,0005
		2.8500
LiYFi	^«3/2-^/13/2	0,8500
ЬиАЮз(1|[112])	^53/2-^/9/2	1,6675
LuaAljOia	^«3/2-^/.3/2	0,86325
		0,8632
	ч, 15/2	1,6525
		1.6630
		1,7762
		2,9406
		2,8298
LU3Al6Ol2 : H03+,		2,6990
SrFg-ErFs [48]		2,7285
		2,7450
		2,7930
¥A10з(||[112])		0,84975
		0,8594
		0,84965
		0,85165
		1,6632
		2,7309
УзАЬОи		0,86275
		0,86275
		1,632
		1,7757
	'/п/2-^/1	2,8302
		2,9364
Y3AIA.		1,6602
		1,6452
Y3Al50i,:Yb=+ *(Ъ%)*		1,6459
YbgAltOiS		1,6615
YbsEri.sAlsOi, [49]	^«3/2-^/9/2	1,7760
^C.75ETO.25AIO3 [49]	^«3/2-^/9/2	1.6631
(У, Er)зА18012(||[100])		2,8302
		2,9364
ZrO^-ErA (12%)	-'15/2	
		1,850
		1,894
		1,9
CaMo04:Er3+ (0,75Й)		1,9115
		1,9060
		1,91
		1,911
		1,916

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура. К
ErAlO3	3Я4 We	1,872	77
(Er, Lu) AlO3	3//4 We	1,8845	77
Er^O3	W4 -	1,934	77
	- We	1,880	77
		I ^884	
		2,014	85
GdAlOg	W4 -	1,8529	77
LiNb03		1,8532	77
LiYFj [50]		2,3030	77
		1,8890	77
		1,9090	—
ЬизAЬOx,	We	1,8855	77
		2,0240	—
LU3AUO12 : Crs-f [38]		2,3425	110
a-NaCaErFj	W 4 ^ W e	1,8580	77
		1,8806	
SrF,		1,972	77
УА10з:Cr3+ (II [112])		2,274	300
YAIO3 : (0,75%)		2,318	300
		2,353	—
		2,354	300
		2,355	—
		2,274	300
		2,318	—
YAIO3 : Cr3+ (0,1%)		2,34	300
YAlOз : (0,1%)	W4 - > We	1,856	90
		1,883	
		1,9335	ад
YAlOз (30% Er3+)	**W4** We	1,861	77
YAIO3 : Cr3+ (0,1%)		2,348	300
		2,349	—
YsAl.Oi,	W j We	1,8834	77
		2,0132	85
YAI5O12 : Cr3+ (0,5%)		2,0132	77
YAlOз : Cr3+ (0,01%)	W4 Wb	2,324	300
(Yb, Er)3 AlsOia	**W4** We	1,8850	77
		2,0195	—
yvOi	W , - We	2,019	295
ZrOa - Er,Oз	W4 We	1,896	77
	Иттербий (Yb3+,		
Bi.GegOi^ [35]		1,030	77
CaPr : Nd^^ (1 - 2 %)		1,0336	-120

Продолокении табл. 34.3

кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура. K
GdsCajOia : 2%)		1,0232	77
Gd3Sc2Al30j2:NdS+ (1,5%)		1,0299	77
LU3Al5Ol2 : Nd3+ 1%)		1,0294	77
		1,0297	175
Lu3Ga50i2:Nd3+ (1,5%)		1,0230	77
Ьиз5сгА1зОи:Кёз+ (1,5%)		1,0299	77
YgAleOia		1,0296	77
		1,0293	–
Y3AUOi.:Nd3+(~0,8o/o)		1,0297	200
Y3AUOl2 : Nd3+ (-0,8%) Сгз+ (0,5%)		1,0298	210
YgGasGia : Nd3+ (1,5%)		1,0233	77
(Y, Yb)3 Al5O12		1,0293	77
(Yb, Lu)3 AlsOw		1,0294	77
	Уран (U3+, 5/s)		
BaFa		2,556	20
CaF^		2,613	300
		2,57	300
		2,51	77
		2,44	77
		2,24	77
SrF,		2,407	90; 77; 20

34.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ НЕОДИМОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ СТЕКОЛ

Стекло, активированное неодимом, — наиболее распространенный и широко применяемый материал для твердотельных лазеров. Отечественная промышленность и зарубежные фирмы выпускают более 50 марок активированных неодимом стекол.

В табл. 34.4 и 34.5 приведены физико-химические, оптические и спектрально-люминесцентные характеристики промышленных неодимовых лазерных стекол, выпускаемых в СССР. Все отечественные стекла имеют силикатную или фосфатную основу. Стимулированное излучение связано с переходами между электронными уровнями активаторного иона Nd='+. Приведенные в таблицах спектрально-люминесцентные характеристики относятся к переходу •'/^з/г—^^wn-

Одной из наиболее трудно определяемых спектроскопических характеристик лазерных материалов является пиковое сечение генерационного перехода. Разные работы дают противоречивые значения этой величины. В табл. 34.5 приведены сечения переходов, измеренные лазерной методикой в аналогичных условиях [51].

Лазеры на неодимовых стеклах работают в импульсном режиме. Для накачки обычно используются импульсные ксеноновые газоразрядные лампы.

Более подробные сведения о неодимовых лазерных стеклах можно найти в [51—53].

Таблица 34.4. Физико-химические свойства неодимовых лазерных стекол [51, 52]

Марка стекла	102» СМ-»	Плотность, 10- кг/см-	Теплопроводность, Вт/(мК)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг-К)	Коэффициент линейного Р ™ Н „ Я .	Модуль Юнга, 10" Па	Модуль сдвига, 10" Па	Коэффициент Пуассона
			Силикатные стекла					
КГСС 3	2,02	2,90	–	–	113	6,37	2,16	0,25
КГСС 5	3,96	2,93	–	–	110	6,42	–	0,25
КГСС 7	5,93	2,96	–	–	105	6,50	–	0,25
ЛГС 5	6,03	3,01	–	–	102	–	–	–
ЛГС 236	1,83	2,56	0,62	670	93	7,79	3,19	0,22
ГЛС 1	1,90	2,66	0,98	710	94	7,35	2,99	0.23
ГЛС 2	1,98	2,70	–	--	119	6,78	–	0,23
ГЛС 3	5,30	2,70	–		121	6,83	–	0,24
ГЛС 4	4,56	2,66	0,70	710	112	6,93	2,84	0,22
ГЛС 5	0,97	2,72	0,49	670'	113	5,78	2,25	0,27
ГЛС 6	1,96	2,74	0,49	670	114	5,68	2,25	0,26
ГЛС 7	3,05	2,81	0,40	670	113	6,17	2,45	0,26
ГЛС 8	5,16	2,86	–	–	108	5,98	2,35	0,27
ГЛС 14	4,56	2,73	0,70	690	108	7,0	2,75	0,23
ЛГС 59	4,68	2,62	–	–	114	6,55	2,64	0,23
			Фосфатное стекло					
ГЛС 21	1,38	3,49	0,40	570	106	5,33	2,06	0,29
ГЛС 22	2,0	3,51	0,40	***570***	106	5,58	2,19	0,28
ГЛС 23	3,6	3,52	-	–	–	5,58	–	0,28
ГЛС 24	5,7	3,52		–	-	5,58	–	0,28
ГЛС 25	2,33	3,35	0,41	670	111	5.12	–	–
ГЛС 26	3,30	3,40	0,41	670	102	5,12	–	–
ГЛС 27	12,7	3,40	0,44	570	94	5,34	–	0,29
ГЛС 32	2,0	3,38	0,50	–	103	5,42	-	0,28
ЛГС 40	2,75	2,50	-	–	156	5,06	2,0	0,26
ЛГС 41	3,06	2,67	-	-	112	–	–	–
ЛГС 54	2,01	2,81	–	–	170	4,76	1,86	0,28
ЛГС 55	1,90	2,66	0,77	840	127	5,82	2,30	0,26
ЛГС 56	1,93	2,70	0,56	880	128	6,61	2,65	0,25
ЛГСИ-1	1,33	3,38	0,42	670	106	5,39	2,10	0,29
ЛГСИ-2	2,33	3,39	0,42	670	i11	5,12	1,98	0,31

Таблица 34.5. Оптические и спектрально-люминесцентные характеристики промышленных неодимовых лазерных стекол [52, 53]

Марка	Показатель преломления (i. = 1,06 мкы)	Коэффициент дисперсии	Коэффициент Брюстера, 10-» имм/Н	Показатель поглощения (X = 1,06 мкы), *10-'* см»	Длина волны максимума люминесценции	ширина полосы люминесценции (^3/2 •J'II/2).	Время жизни метастабильного МКС	Сечение генерационного перехода (^3/2 ^-^11/2). 10-20 см!
				Силикатные стекла				
КГСС 3	1,533	57,5	2,4	3 - 5	1,058	-	570	2,1
КГСС 5	**1,536**	57.5	2,4	3 - 5	1,057	-	510	2,1
КГСС 7	1,542	57,2	2,4	3 - 5	1,057	-	390	2,1
ЛГС 5	1,543	55,7	-	3 - 5	-	-	370	2,0
ЛГС 236	1,567	43,9	2,9	2 - 3	1.059	–	350	2,9
ГЛС 1	1,523	57,9	2,7	1—**3**	1,058	35	440	2,4
ГЛС 2	1,518	–	2,8	2	-	29	460	2,2
ГЛС 3	1,518	-	2,8	2	-	-	360	2,5
ГЛС 4	1,516	57,8	-	1—3	1,058	-	480	2,0
ГЛС 5	1,533	52,4	2,2	1 - 3	1,057	-	570	1,6
ГЛС 6	1,538	52.2	2,3	1 - 3	1,057	35	500	1,6
ГЛС 7	1,542	51,2	2,2	1 - 3	1,057	35	410	2,1
ГЛС 8	1,548	50,6	2,2	1 - **3**	1,057	-	290	2,1
ГЛС 14	1,525	56,9	2,4	2 - 5	1,057	–	420	2,0
ЛГС 59	1,529	52,0	-	1 - 2	1,057	-	440	2,0
				Фосфатные стекла				
ГЛС 21	1,582	**58,6**	1,1	1—2	1,055	-	340	**3,5**
ГЛС 22	1.**582**	58,7	1,3	1 - 2	1,055	28,6	300	**3,5**
ГЛС 23	**1,582**	-	**1,3**	**1 - 2**	1,055	-	**250**	**3,5**
ГЛС 24	**1,582**	–	**1,3**	**1 - 2**	1,055	-	210	**3,5**
ГЛС 25	1,568	**65,3**	**1,3**	**1 - 2**	1,054	-	270	3,0
ГЛС 26	1,564	65,7	1.4	**1 - 2**	1,054	–	230	3,0
ГЛС 27	**1,568**	-	1,4	1 - **2**	1,054	-	90	3,0
ГЛС 32	**1,582**	**56,5**	1,3	1 - 2	1,054	-	270	**3,2**
ЛГС 40	1,493	67,0	-	1—2	1,054	24,0	200	4,0
ЛГС 41	1,506	69,5	-	**1 - 2**	1,054	–	230	2,9
ЛГС 54	**1,562**	44,8	**2,1**	1—**2**	1,055	26,7	260	**3,9**
ЛГС 55	1,521	63,4	2,0	**1 - 2**	1,053	30,0	310	2,8
ЛГС 56	**1,532**	**63.3**	1,**9**	**1 - 2**	1,054	29,5	300	3,1
ЛГСИ-1	**1,565**	65,7	**1,3**	**1 - 2**	-	-	-	–
ЛГСИ-2	**1,568**	**65,3**	**1,3**	1 - 2	–	-	300	3,0

34.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В полупроводниковых лазерах, в отличие от лазеров на примесных кристаллах, активным веществом служит сама кристаллическая матрица полупроводника, а примеси лишь служат источником носителей заряда: электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. При создании с помощью накачки избыточного (по сравнению с равновесным) числа электронов и дырок позможно возвращение к состоянию равновесия посредством оптического межзонного перехода — фоторекомбинации. Вероятность фоторекомбинации велика лишь для прямозонных полупроводников, таких, у которых максимум энергии в валентной зоне и минимум энергии в зоне проводимости соответствуют одному и тому же значению квазиимпульса. По этой причине все полупроводники, на которых получена генерация, являются прямозонными Перечислим важнейшие свойства полупроводниковых лазеров;

1) компактность, обусловленная большим коэффициентом усиления (10' СМ"');

2) большой КПД (до 40%);

3) широкий диапазон длин волн генерации (0,3—30 мкм) и возможность плавной перестройки длины волны генерации, обусловленная зависимостью ширины запрещенной зоны полупроводника от температуры, давления, магнитного поля и т. п.;

4) малая инерционность, позволяющая модулировать излучение изменением накачки с частотой до 10 ГГц.

Инверсия иаселенностей для перехода с энергией tiw возникает при условии ***AF=Fc—Fz:>h^ü>Eg,*** где f-c и Fv — квазиуровни Ферми для электронов и дырок соответственно; Eg — ширина запрещенной зоны На практике часто энергия фотона меньше номинального значения ширины запрещенной зоны, что связано с появлением при сильном легировании примесных зон на краю запрещенной зоны.

Для создания инверсии в полупроводниках используют четыре типа возбуждения: инжекцию носителей заряда, электронную накачку, ударную ионизацию (лавинный пробой) и оптическую накачку. Наибольшую эффективность имеют два первых типа накачки, которые и получили самое широкое распространение.

В качестве резонаторов полупроводниковых лазеров обычно используют плоские резонаторы, образуемые параллельными гранями кристалла. Для получения более эффективной спектральной селекции применяются внешние резонаторы с соответствующими селектирующими элементами, а также резонаторы с распределенной обратной связью (РОС). В РОС-лазерах периодические возмущения, определяющие спектральную селекцию, вносятся по всей длине активной среды. Коэффициент отражения, обеспечиваемый периодической структурой, оказывается достаточным для возникновения генерации без дополнительных зеркал. Периодическое возмущение, внесенное лишь на конце активного слоя, воспроизводит эффект зеркала и носит название распределенного брэгговского рефлектора.

Литература обзорного характера и монографии, включающие описание свойств полупроводниковых лазеров, указаны в [54—59]

Материалы для полупроводниковых лазеров. В качестве активных сред полупроводниковых лазеров используются в подавляющем большинстве случаев бинарные полупроводниковые соединения или многокомпонентные твердые растворы на их основе, так как элементарные полупроводники не являются прямозонными. В табл. 34.6 представлены полупроводниковые материалы, используемые в качестве рабочего вещества лазеров, и указан способ накачки.

Твердыми растворами называют вещества, имеющие одинаковый тип кристаллической решетки и способные

Таблица 34.6. Материалы полупроводниковых лазеров [54]

	Рабочее вещество	Длина волны, мкм
	GaN	0,36
	GaAs	0,83-0,92
	InP	0,89-0,91
	GaSb	1,5—1,6
	InAs	3,0-3,2
	InSb	4,8—5,3
	(Ga, In)P*i	0,56—0,9 [56]
	(Al, Ga) As*i	0,63-0,9 [56]
	Ga (As, P)*i	0,63-0,9 [56]
	(Al, Ga) (PAs)	0,63-0,9 [56]
	(In, Ga)As*i	0,9-3,4 [56]
	ln(P,As)	0,9-3,2
	Ga(As, Sb)	0,95-1,6
	In (As, Sb)	1,0-5,3
	(Al, Ga)Sb	1,2—1,8 [56]
	(In, Ga) (P, As)	0,62—3,2
	(Al, Ga)(As, Sb)	0,62-1,6
	ZnO	0,37
	Zn	0,33
	ZnSe	0,46
	ZnTe	0,53
	CdS	0.49
	CdSe	0,69
	Cdre	0,79
	(Zn, Cd)S	0,33-0,49
	C(S, Se)	0,59-0,69
	(Cd, Hg)Te	
	PbS	4,3
	PbSe	8,5
	PbTe	6,5
	P(S, Se)	4,7—5,5
	(Pb, Sn)Se	8,5—32
	(Pb, Sn) Te	6,5—32
	(Pb. Ge)Te	4,4—6,5
	(Pb, Cd)S	3.5
	Te	3,7
АЗВ«	GaSe	0,59-
	InSe	0,97
a1 B"	InaSe	1.6
	СзР.	2,1
	CdSnPa	**1,1**
	CdSiAs^	0,77

Лазеры производятся промышленностью.

••2 Здесь И — **инжекция,** Э — электронный пучок. О —с ческая накачка. П — пробой.

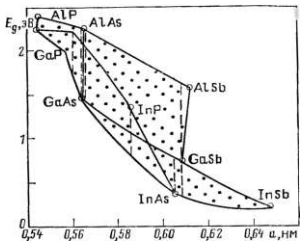


Рис. 34.12. Зависимость ширины запрещенной зоны от периода решетки в полупроводниковых соединениях типа A'B'' и твердых растворах на их основе [60]

образовывать непрерывный ряд растворов с переменной концентрацией компонентов, что позволяет изменять ширину запрещенной зоны полупроводника (рис. 34.12)

В гетеролазерах требуется, чтобы контактирующие материалы обладали одинаковым типом и периодом решетки. Единственным тройным твердым раствором, в котором изменение ширины запрещенной зоны практически не сопровождается изменением периода решетки, является AUGai_*As (рис. 34.12), что и обусловило широкое применение этого соединения в гетеропереходах AlxGai-*—GaAs. Для четверных соединений можно добиться совпадения периода решетки с периодом бинарного соединения с помощью изопериодического замещения двух атомов. Так, в четверном растворе Ga,Ini_:Pi-i/Ass, можно подобрать ***х и у*** так, чтобы влияние Оа и As на период взаимно компенсировалось и период решетки совпадал с периодом бинарного соединения InP. Смешение в твердом растворе соединений, обладающих зонами разных типов, позволяет производить переход от прямозонного проводника к непрямозонному изменением концентрации компонентов. Примером таких соединений служат GaPtAsi-*; Ini-xGa^P; .AUGai_:As. В твердом растворе Pbi_,Snj(Se при x=0,15 ***(T=12*** К) ширина запрещенной зоны проходит через нуль, что позволяет создать длинноволновые лазеры (длина волны генерации Я=32 мкм).

Инжекционные лазеры. Простейший инжекционный лазер, или гомолазер, по существу представляет собой сильно легированный р—«-переход, при смещении которого в прямом направлении неосновные носители заряда инжектируются сквозь р—«-переход на расстояние порядка диффузионной длины и рекомбинируют с основными. При фоторекомбинации в плоскости р—п-перехода возникает вынужденное излучение. Пороговая плотность тока такого лазера на GaAs составляет 20—50 кА/см^ при Г=20°С. Уменьшение пороговой плотности тока до 5 кА/см^ достигнуто в односторонних гетероструктурах, где наряду с р—«-переходом имеется гетеропереход в полупроводник с большей шириной запрещенной зоны, например гетеропереход GaAs—AbGai_,As. Гетеропереход расположен на расстоянии от р—п-перехода, меньшем диффузионной длины, и препятствует диффузии неосновных носителей (электронное ограничение), увеличивая тем самым их концентрацию. Поскольку большей подвижностью обладают обычно электроны, гетеропереходами, как правило, являются р—р-переходы. Еще большее уменьшение пороговой плотности тока (для значений ниже 1кА/см2) при Г=20°С достигнуто в двойных гетероструктурах (ДГС) использованием как ограничения неосновных носителей заряда (электронов и дырок), так и оптического ограничения генерируемого излучения. В ДГС активная область расположена между двумя гетеропереходами. Например, в ДГС на основе AbGai_:,As это слой р GaAs с шириной запрещенной зоны £g= =1,4 эВ, расположенный между слоями р АЬСа.-лг.Аз (£^=1,8 эВ).

Поскольку показатель преломления узкозонного полупроводника с ДГС больше, чем показатель преломления широкозонных слоев, возникает волновод, локализующий генерируемое излучение вблизи активной области. Выходная плотность мощности полупроводникового лазера ограничена лучевой прочностью кристалла, поэтому для повышения выходной мощности гетеролазера используют раздельное ограничение носителей и излучения в пятислойных структурах, например;

р ALGai-.As	£«=1,8 эВ;
р Ali,Ga,_jAs	£r=|,5эВ;
р GaAs	**£g=!,4** эВ;
п A\yQa,-yAs	£fi=!,5 эВ;
п Al,Ga,-,As	£8=1.8**эВ**;

причем *«0,3; y~0,\.

Активным слоем является GaAs, электронное ограничение присутствует на границах слоя GaAs, а стенками волновода служат переходы между AbGai-;tAs и Alj,Gai-^As. Раздельное ограничение по носителям и излучению в пятислойных структурах позволяет также без ухудшения свойств волновода значительно уменьшить размеры активного слоя, что приводит к уменьшению порогового тока. Для получения генерации в широком спектральном диапазоне в ДГС помимо уникальной структур^! ALGai-*As используются многокомпонентные твердые растворы (рис. 34.13).

Для того чтобы ширина активной области лазера была сравнима с толщиной гетероперехода или не сильно превышала ее, применяют ограничение носителей и излучения в плоскости гетероперехода. Лазеры такой конфигурации называют полосковыми. В простейшем полосковом лазере инжекция носителей заряда производится через полосковый контакт при этом осуществляется только электронное ограничение. В более сложных структурах боковому ограничению подвергаются и распределение носителей, и излучение лазера. Методы ограничения носителей сходны с теми, которые применяются для ограничения носителей и излучения в направлении, перпендикулярном плоскости лазера, т. е. р—п-

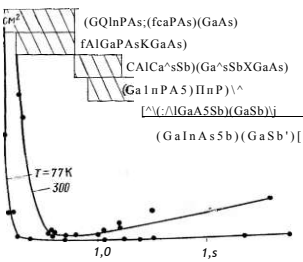


Рис. 34.13. Перекрытие спектральных диапазонов четверными системами типа и спектральная зависимость пороговых плотностей тока в инжекционных гетеролазерах [56]

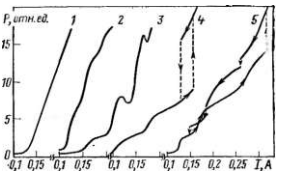


Рис. 34.14. Примеры ватт-амперных характеристик непрерывных полосковых гетеролазеров:

! – линейные; 2, 3 – гладкие нелилсПныс (2 – монотонные, •3 — немонотонные); *4,5* — разрывнь.е *(4* – простая петля, *5* — сашопересекающаяся петля с разрывами) 1571

переходы и гетероструктуры используются в боковом направлении. Помимо того, возможно геометрическое боковое ограничение Если в полосковых лазерах отсутствует боковое оптическое ограничение, то зависимость мощности выходного излучения от тока накачки становится нелинейной (рис. 34.14). Это связано с тем, что поперечный размер лазерной моды в полосковых лазерах сравним с шириной пространственного распределения коэффициента усиления. В максимуме интенсивности лазерной моды происходит и чиболее эффективный съем инверсии, вследствие чего распределение инверсии и коэффициента преломления становится более благоприятным для генерации другой моды Изменение генерируемой моды обуслов-яивает особенности ватт-амперных характеристик полоскового лазера.

Объем активной среды лазера, накачиваемого электронным пучком или светом, в 10^—10" раз больше, чем у инжекционного лазера, что позволяет поднять мощность выходного излучения на нес.чолько порядков. Так, если выходная мощность инжекционного лазера не превышает сотни ватт, то в лазере с электронной накачкой получена мощность 1—2 кВт, а в GaAs-лазере с оптической накачкой 40 кВт [55].

34.6. ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ АКТИВАТОРАМИ

В жидкостных лазерах в качестве активных сред используются растворы, содержащие ионы редкоземельных элементов (TR-ионы). Генерация осуществляется на переходах с метастабильных уровней TR2+-ионов. Для возбуждения применяется оптическая накачка с помощью ксеноновых газоразрядных ламп.

В жидких лазерных материалах может быть достигнута концентрация активных ионов того же порядка, что и в лазерных стеклах. Это позволяет получить большие энергии и мощности излучения с единицы объема активного вещества В то же время сильная зависимость показателя преломления от температуры обусловливает значительные оптические неоднородности, возникающие при накачке активной среды, что приводит к ухудшению генерационных характеристик лазеров и увеличению расходимости лазерного пучка. Применение прокачки активной жидкости через лазерную кювету позволяет реализовать как периодический, так и непрерывный режим работы лазера.

Жидкие лазерные материалы с TH^+-ионами делятся на два класса: металлоорганические, или халатные, и неорганические, или апротонные.

Металлоорганические жидкостные **лазеры.** Активными элементами в металлоорганических лазера,х являются трехвалентные ионы редкоземельных элементов, связанные с органическими группами, или лигандами. Лазерный эффект осуществляется на переходах между энергетическими уровнями **TR-"+-ИОНОВ,** а поглощение энергии накачки происходит чёрез полосы поглощения лиганда. Хелаты имеют очень большие' коэффициенты поглощения (около 100 см-'), поэтому лазерный эффект осуществляется только в тонких слоях вещества. Металлоорганические жидкостные лазеры генерируют в режиме одиночных импульсов.

Различают два главны.^ типа лазерных компаундов:

TR3+ [лиганд]_4д+; TR3+ [ли1анд]_з,

где Q+ означает катион.

Наиболее часто в металлоорганических жидкостных лазерах употребляются следующие лиганды, катионы и растворители.

Л и г а н д ы: трифторацетилацетонат-ион (ТФАА-), бензоилацетонат-ион (БА-), бензоилтрифторацетонат-ион (БТФА-), дейтерированный бензоилтрифторацетонат-ион (ДБТФА-), ортофторбензоилфторацетонат-ион (ОФБТФА-), метафторбензоилтрифторацетонат-ион (МФБТФА-), парафторбензоилтрифторацетонат - ион (ПФБТФА-), ортохлорбензоилтрифторацетонат - ион (ОХБТФА-), метахлорбензоилтрифторацетонат - ион (МХБТФА-), парахлорбензоилтрифторацетонат - ион (ПХБТФА-), ортобромбензоилтрифторацетонат - ион (ОББТФА-), метабромбензоилтрифторацетонат - ион (МББТФА-), парабромбензоилтрифторацетонат- - иов (ПББТФА-), дибензоилметанат-ион (ДБМ-^), теноилтрифторацетонат-ион (ТТФА-), пентафторпропионат-ион (ПФП-), 1,10-фенантролин (Фен), дейтерированный трибутилфосфат (ДТБФ).

К а т и о н ы: пиперидиний (Пип+), дейтерированный пиперидиний (ДПип+), пирролидиний (Пирр+), имидазолии (Им+), диметил-аммоний (ДмА+).

К о м б и н и р о в а н н ы е р а с т в о р и т е л и (в скобках указано объемное отношение):

№ 1 — CH3CH2OH : CHгOH (3 : 1);
№ 2 — CHзCHjOH : CH3OH : (CH3)2 NCHO (12:4:1);
ЛЬ 3 — CH3CH2OH : CHзOH : (CH3)2 NCHO (15:5:2);
№ 4 - CH3CH2OH : CHзOH : (CHз): NCHO (9:3:2);
№ 5 - CH3CH2OH : (CH3)2 NCHO : CH3CH2CH2OH (14 :5 :2);
№ 6 — CCl4 : CH2CHCN (9:1);
№ 7 — CHзCH(OC2H5)CЫ : CH3CN : C2H5OCH2CH2OH **(2:2:1).**

Характеристики ряда металлоорганических жидкостных лазеров приведены в табл. 34.7. Генерация на комплексах Еи+' происходит на переходе Ю0—>-'р2, на комплексах N(5^+ — на переходе ^3,2—>-^/11/2

Неорганические жидкостные лазеры. Активные среды неорганических жидкостных лазеров представляют собой растворы соединений **TR®+-ИОНОВ В** неорганических растворителях сложного состава. Лазерный эффект достигнут пока только для ионов Nd^+ (табл. 34.8). Генерация идет по четырехуровневой схеме на переходе ^ / ^ 3 / 2 — с поглощением света накачки собственны ми полосами поглощения Nd®+. Неорганические жидкостные лазеры могут работать **с** циркуляцией рабочего реществ, дают высокие значения выходной мощности. Эти лазеры работают как в режиме свободной генерации. так и с модуляцией добротности.

Более полюбные сведения о жидкостных лазерах содержатся в

Таблица 34. 7. Металлоорганические ла жидкости П]

Активный комплекс	Растворитель	длина волны ^енерации.	Концентрация комплекса, моль/л	Люминесцентное время жизни, МКС	Ширина линии люминесценции, см-ч
El)3+ (БА-)4 ПИП+	№ 1	0,6130	8,7-10-3	500	21
Еи^* (БА-)4 ПИП+ -1- CHgCOONa	№ 1 ИЛИ № 2	0,6131 0,6114	1110-2 2-'10-2	.—	21 23
(БА-)4 Na+	№ 3 или № 5	0,6111	2-10-2	670	19
El]8+ (ВА-)4NH4	№ 1	0,6130	1,5-10-2	–	
Еиэ-^ (ДБМ-)4 ПИП+	№ 4	0,6120	1,5-10-2		16
Eus+ (ДБМ-)4 Пирр+	CH_3CN	–	2,5-10-='	—	
Еи3+(ТФАА-)4 NH4	№ 1	0,6122	1,5-10-2	–	—
	CH_3CN	0,6119	1-10-2		
Eus+ (ТТФА-)4 ДМА-»	CH_3CN	0,6125	5-10-2		
Еи3+ (БТФА-)4 ИМ»	CH_3CN	0,6118	7,5-10-='		69
Еи3+ (БТФА-)4 Пирр»	CH_3CN	0,6118	5- Ю-з		107
Еи3+ (ВТФА-)4 ПИП+	CH_3CN	0,6119	1-10-2		91
Еи3+ (БТФА-)4 ДПИП+	№ 7	–	1,135-10-2	**700**	
Еи3+ (ДБТФА-)4 ПИП+	№ 7		1,135-10-2	**680**	
Еи3+ (ДБТФА-)4 ДПИП+	№ 7		1,135-10-2	660	
Еиэ^ (ВТФА-)4 ДМЛ+	CH_3CN	0,61175	7,5-10-='		83
(оФБТФА-)4 ДМА+	CH_3CN	0,61167	7,5-10-3		80
Еи8+ (МФБТФА-)4 ДМА+	CH_3CN	0,61178	7,5-10-^		**87**
Eus+ (ПФБТФА-)4 ДМА+	CH_3CN	0,61173	7,5-10-='		
Еи3+ (оХБТФА-)4 ДМА+	CH_3CN	, 0,61174	7,5-10-2	—	67
Еи3+ (МХБТФА-)4 ДМА+	CH_3CN	0,61171	7,5-10-3		85 ,
EijS+ (ПХБТФА-)4 ДМА+	CH_3CN	0,61172	7,5-10-3		85
Еи8+ (оББТФА-)4 ДМА+	CH_3CN	0,61174	7,5-10-3		67
Еи3+ (МББТФА-)4 ДМА+	CH_3CN	0,61173	7,5-10-3		83
Еи3+ (ПББТФА-)4 ДМА+	CH_3CN	0,61171	7,5-10-3		87
Tbs+ (ТФАА-)з	CH_3CN	0,5470	2,5-10-3		
Nds+ (ПФП-)з Фен	$(CO_3)_2$ so	1,057	2-10-1		Ш
Nd3+ (ТТФА-)4 Пирр»			1-10-2		
WMN07)s(ДТБФ)з	CeFj или CCl_4	1.054	2-10-1	11	100

Таблица **34.8 Неорганические лазерные жидкости PJ**

Состав лазерной жидкости		Концентрация активатора, моль/л	Люминесцен	Ширина лннии люминесценции, см-1
Nd8+ —SeOCb —SnCU	1,056	0,5 М		**145**
	1,058	**0,1 М**		
	1,058	0,3 М	230	**165**
Nd3+- SeOCla — SbCls			225	
Nd3+ - SOCl2 - GaClg [23	1^575		270	102
Nd3+-POC13-SnC14	1,0525	40/0*		145
	1,0522	**0, 86%***		100
Nd3+_roCb-Tia3	1,0525		230	
	1,0542		140	
Nd3+ - POCI3 - AICI3	1,054	0,15 М	300	
	1,05219			
Nds-^-POCla-ZrCU	1,0522	0,3 м		
Nds^-PBrg-AlBrg-SbBrg	1,066	*0,5%*		

' Массовое содержание.

возникновением инверсной населенности колебательных подуровней первого возбужденного синглетного состояния Si по отношению к колебательным подуровням основного состояния So. Коэффициент усиления с учетом триплет-триплетного поглощения и поглощения из возбужденного состояния Si имеет следующий вид [62]:

s.

$$\frac{h\,(V_{gj}\text{--»})}{} \qquad (34.1)$$

Здесь у-s.^Sc (v) (^)п — предельный коэффициент усиления; ***v,*** см/с — скорость света в среде; ***hv,*** Дж —энергия кванта; ***Bs,*** s,,, ***Bst-*Si,*** Дж-'-с-'-см® — коэффициенты Эйнштейна для вынужденного испускания, синглетного и триплетного поглоше-



Фоссрорещети-я

„„я соответственно; — ' $\frac{{}^{n}s.}{«}$ » $\frac{{}^{n}7,}{}$ - относительные населенности уровней So, S,, Ti; n, см-» —

М. (34.2)

Рис. 34.15. Схема синглетных (S() и триплетных (Г,) уровней энергии сложной молекулы (у каждого уровня показана относительная ориентация спинов внешних электронов)

а также при накоплении на триплетиом уровне T, такого числа молекул, что

«Г, / (34.3)

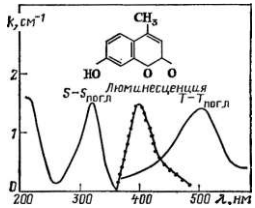


Рис. 34.16. Спектры поглощения (S—Snorn), люминесценции и триплет-триплетного поглощения (Т—Таоти) нейтральной формы 7-окси-4-метилкумарина

В стационарном режиме

«Г. / «S. = ^s.^r. / ' (34.4)

где —вероятности соответствующих переходов. Следовательно, невозможен стационарный режим генерации лазера на красителе, для которого выполняется условие

< Bj^^T^ Ps.^T, / Pr.-S. • (34.5)

При импульсном возбуждении возможна генерация и при выполнении условия (34.5). Из (34.5) следует, что эффективные лазерные красители должны обладать: высоким квантовым выходом люминесценции; слабым перекрытием спектров Ti—T,, и Si—S, поглощения со спектром люминесценции; малым накоплением молекул в триплетном состоянии, что возможно при малом значении вероятности Psi — n и большом значении вероятности Pt1___ so- Насколько жесткими являются эти требования, можно судить по тому, что из тысяч промышленных красителей генерационной способностью при накачке импульсами наносекундной длительности обладают лишь несколько сот соединений При накачке микросекундными импульсами генерируют десятки соединений, а при более длинных импульсах, с X порядка ста микросекунд, — вообще единичные красители. Анализ генерационной эффективности красителей различных классов показывает, что в большей или меньшей степени указанным выше требованиям удовлетворяют следующие красители: производные оксазола, оксадиазола, бензола и их конденсированных аналогов; производные кумарина, родамина, оксазина и полиметиновые красители.

В табл. 34.9 представлены спектрально-люминесцентные и генерационные свойства наиболее эффективных лазерных красителей.

34.7. ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ

В Настоящее время красителями принято называть химические соединения с разветвленной системой сопряженных химических связей, обладающие интенсивными полосами поглощения в видимой или ближней ультрафиолетовой области спектра. Схема уровней энергии молекулы красителя приведена на рис. 34.15. Общими особенностями спектроскопических характеристик красителей являются зеркальная симметрия спектров поглощения So—Si и люминесценции, а т.чкже частичное перекрытие спектра люминесценции спектром поглощения (рис. 34.16).

Усиление света и генерация света в растворах красителей при их оптическом возбуждении обусловлены

Таблица 34.9. Спектрально- люминесцентные и генерационные характеристики наиболее эффективных лазерных красителей [62]

[^погл' ^люм ~ длины ВОЛН, соответствующие максимумам спектров поглощения и люминесценции; vj — квантовый выход люминесценции; ('^погл) — коэффициент Эйнштейна в максимуме спектра поглощения; т^^ — время жизни первого возбужденного синглетного состояния S^; Хнак — Длина волны излучения накачки; (X, — Хз)ген — поглощение спектра генерации; 7 — КПД генерации; К (^нак) — коэффициент поглощения на длине волны накачки; FL — накачка газоразрядной импульсной лампы. Растворители; DMF —JV, W-диметилформамид; Etan — этанол; EG.—этиленгликоль. Индекс «оси» означает основание, «кисл» — кислота]

Краситель	Растворитель	,макс ^ погл	^макс люм '	l%	(ср. Дж-›.с-'·см-	10-»» с	'•нак' нм	(^.-«ген, нм	т. %	
р-терфенил	DMP е л о , Etan	284 280 277	345 343 340	30 70 85	E		265 265 265	330—360 330—362 330-362	-	–
р-кватерфенил	DMF СоНбСНз	300 298	373 374	68 49	-	-	337 265 337	355-390 362—390 362-390	-	-
2-фенил-5-(4'-бифенилил)-1, 3, 4-оксадиазол) (PBD)	е л о , Etan евн^енз	307 302 308	361 365 365	86 21 24	-	—	347 337 347 347	370-386 372—400 372-384 374—384	31 6 17	7 3 20
2,5-ди-(4'-бифенил)-I, 3, 4-оксадиазол (BBD)	евНбеНз	312	383	47	-	-	347	374-386	17	18
2,5-дифенил - 1 , 3 , 4-оксадиазол (PPD)		284 280	334 332	65 82	–	-	337 337	383—395 383—395		-
2,5-ди-п-нафтил-1, 3, 4-оксадназол (aNaND)		337	392	75	-		337 347	384—397 388—394	14	20
1,4-дифенил-1,3-бутадиен	ееНвенз	333	383	23	–	-	265 353	383 383		–
2,5-дифенил-1, 3-оксазол (PPO)	е л о .	306 305 304	366 365 364	99 77 90	4 5 5	16 10 11	347 347 337 347	360—370 372—392 375—387 378-386	4 5 5	14 16 6
2-(а-нафтил)-5-фенил-1, 3-оксазол («NPO)	С Л О 2	334	400	77	–	-	347	396—406	13	23
2,5-ди-(4'-бифенил)-1, 3-оксазол (BBO)	ееН^СНз	340 340 340	409 406 407	83 76 96	—	—	347 337 347 347	404—420 404—420 408—418 У порога	16 29	19 22 4
1, 4-ди-(5'-фенил--1', 3'-оксазол-2'-ил)-бензол (POPOP)		360 361	420 426	84 87	8 10	14 11	337 347 347 347	414-426 416—418 416—418 428-430	27 22	18 22 19

Продолжение табл. 34.9

Краситель	Растворитель	$\lambda_{погл}$, нм	J, макс люм,		(q ;) . Дж-'-с-> -см-	10-»» с	"цак», нм		Т. %	см-»
1, 4-ди-[5'-(4"-метилфенил)-!' , 3'-оксазол-2'-ил]-бензол (диметил POPOP; TOPOT)	Etan C4HA	364 364	431 429	86 88	_	—	347 347	424—432 424—436	24 34	7 20
2-[4'-(4"-фенилстирил)-фенил]-5-феннл-I, 3-оксазол	DMF	368	435	99	-	-	347	434-438	17	20
1, 4-дистирилбензол	DMF	356	—	—	8	—	347 347 347	408—422 408—424 408—422	29 23 14	32 13 7
1-стирил-4-[ю-винил-(р-бифенилнл)] бензол	DMF	370	—	_	3	—	347 347 347	45.4—442 426-442 430—442	30 23 16	24 12 6
4-метил-7-днэтиламинокумарин (кумарин 1)	Etan	375	454	70	5	29	337 347 FL	442-476 448—460 457—475	25 0.1	19 30
4-метил-7-гидроксикумарин (Э-метилумбеллиферон: кумарин 4)	EtanocH	370	455	95	3	42	337 347 FL	444—473 446—462 456-467	17 0,1	19 30
7-гидроксикумарин		375	461	95	_	_	337 347 FL	446—480 454-474 457-465	M 0,1	16 30
4-метил-6-гексил-7-гидроксикумарин		386	460	90	_	-	337 347 FL	449—478 450—480 458-472	"s 0,15	16 30
3-карбоэтокси-7-гидроксикумарин (кумарин 15)	Etan(,,,,,)	416	460	70	-	-	347 337 FL	450-475 455-471 460—480	16 0,12	16 30
3, 4-диметил-7-гидроксикумарин		366	460	90	-	_	347 337 FL	450—485 452—483 460-480	15 0,15	16 30
Кумарин 102	Etan	396	-	_	-	-	347 337 FL	450-500 460-500 480-500	20 0,18	16 30
3-хлор-4-метил-7-ацетоксикумарин	Etan(«,,,)	394	476	69	4	28	337 347 FL	463-498 476—484 474-507	13 0,1	22 30
3-карбоэтокси-6-гексил-7-гидроксикумарин		426	454	_	-	-	337 347 FL	465—483 465-485 476—484	0,13	30

Продолжение табл. 34.3

Краситель	Растворитель	ПОГЛ	nlOM		Дж-'.с-'-ем»	10-" с	V H .		lf. %	
3-фенил-7-ацетокси-кумарин		400	475	76	6	30	337 347 FL	470-494 474—494 481—495	19 0,1	14 30
3-ацетил -6-гексил-7-гидроксикумарин		443	468	-	-	–	347 FL	475-505 494—500	*o7i*	*Ж*
Кумарин 334	Etan	454	496	-	-	-	337 347 FL	475—508 475—510 513—518	0,15	30
3-циано-6-гексил-7-гидроксикумарин		444	465	-	-	-	337 347 FL	490—510 490—510 502-509	0,15	30
Кумарин 1 -f диан-гидрид ПТК	Etan^ocH)						347	495-515	10	20+0,7
Кумарин 1 + диан-гидрид ПТК							347	505-525	10	204-2
1-амино-Л/-метил-антрапиридон	DMF	454	500	33	3	45	347 347	502-512 504-510	3,5 4	27 15
Амидин	DMF	466	540	37	2	71	347 347	537-548 540—550	8 7	16 28
Антрапиридон 8	Etan	-	-	-	-	-	347	545-575	8	18
Диангидрид перилен-3, 4, 9, 10-тетракарбоновой кислоты (диангидрид ПТК)		468	486	99	4	119	337 347	512—530 516-532	8	7
Флуоресцеин Na (уранин)	Etan	500	522	61	7	50	337 347 347 347	536—556 538—562 544-562 549—566	4 6 5	3 9 16
Незамещенный родамин (родамин 110)	Etan	505	529	85	12	71	347 FL 347	554—570 556—567 564—574	4 0,15 5	8 23 18
Родамин 6G (родамин 6G — DN; в отечественных изданиях родамин Ж)	Elan	530	556	85	20	76	337 347 FL	568—595 570—580 583-593	22 0,5	17 23
Родамин G (родамин Y; в отечественных изданиях родамин 6Ж)	Etan	530	558	82	—	—	347 FL	574—586 580-598	20 0,4	16 23

Продолокение табл. 34.3

краситель	Растворитель			'Ij%	/макс)	10-" с	V k .		Ь %	
N, Л/'-тетраэтилродамин (родамин В: родамин С)	Etan	543	572	55	-	-	337 347 FL	584—612 596—616 611—624	15 0,25	15 23
Родамин 3В (родамин 4С)	Etan	555	578	61	20	37	347 337 FL	600—624 609—632 622—632	13 0,3	16
Оксазин 9 (крезиловый фиолетовый)	Etan	606	630	38	20	35	337 347 FL	651—689 652—684 660—700	5 0,25	7 23
Нильский голубой	Etan	635	676	-	-	-	337 347 FL	686—714 698—720 696—720	5 0,1	8 23
1, Г-дифенил-3,3'-диэтил-5, 5'-дикарбоэтокси-2, 2'-имидадикарбоцианин нодид (№ 2636 У)	Etan DMF	618	652	35	63	20	347 347 347	660—720 681—693 687—702	8 14	15 3
1, Г-дифенил-3,3'-диэтил-5, 5'-ди-(бензоксазол-2"-ил)-2,2'-имидадикарбоцианин иодид (№ 1950 У)	Etan DMF	633	665	40	71	25	347 347	680-740 708—720	7	6
3,3'-диэтил-2,2'-оксатрикарбоцианин иодид (DOTC иодид)	Etan	689	718	53	-	-	694	730—740	37	18
3, 3'-диэтил-б, 7; 6'. 7'-дибензо-10, 12-триметплен-11-хлор-2, 2'-оксатрикарбоцианин иодид (№ 2780У)	Etan DMF	752	780	13	48	12	694 694	790—825 792—822	17 30	20 20
1, 3, 3; Г, 3', 3'-гексаметил-4, 5; 4' , 5'-дибензо-2, 2'-индодикарбоцианин иодид (№ 4568)	Etan EG	682	720	12	56	7	694 694 694	720—740 722-738 726—748	25 32 30	20 17 30
1, 3, 3; Г, 3', 3'-гексаметил-2, 2'-индотрикарбоцианин нодид (НІТС иоднд; № 341)	Etan	744	770	28	34	31	694 750	780—826 780—826	38 45	12 12
1, 3, 3; 1', 3', 3'-гексаметил-10, 12-триметилено-11-хлор-2,2'-индотрикарбоцианин иодид (№ 2781)	Etan DMF	742	805	3	22	2	694 750 694	816-844 816—844 816—844	28 40 33	19 19 19

Продолжение табл. 34.3

Краситель	Растворитель	^макс ^ нм'	^макс	%	(- р .	^St' lo-w с	V K нм	нм	т. %	(VH). см-1
1, 3, 3; 1', 3', 3'-гексаметил-4, 5; 4', 5'-дибензо-2, 2'-индотрикарбоцианин перхлорат (№ 3899)	Elan DMF EG	780	844	2	44	2	694 694 694 770	844-890 844-890 844—890 844—890	8 10 17 17	20 20 20 20
1, 1'-дибензил-4, 4'-хинокарбоцианин бромид (№ 3963)	Elan EG DMF	706 723	730 735	2 16	55	1	694 694 694	740—760 740—760 742-762	14 36 30	15 15 15
I, 1'-ди-(2"-фенилэтилен)-4, 4'-хинокарбоцианин иодид (Ло 3966)	Etan EG DAiF	710 723	731 735	3 18	65 60	2 13	694 694 694	740—762 740—762 742—764	 35 33	18 18
Дибензцианин С 1056	Etan	687	-	-	–	-	694	766—780	10	18
1, Г-диметил-2, 2'-ди-(3", 4"-диметоксифенил)-5, 6; 5', 6'-дибенз-4, 4'-хинокарбоцианин иодид	Etan	750	7Q3				694	820—854	18	18
1, Г-Д11метил-2, 2'-ди-(4"-метоксифенил)-5, 6; 5', 6'-дибенз-4, 4'-хинокарбоцианин иодид	DMF	768	793	3			694	853—874	35	18
1, Г-диметил-2, 2'-ди-(4"-хлорфенил)-5, 6; 5', 6'-дибенз-4, 4'-хинокарбоцианин иодид	DMF	764					694 694	860—906 882—914	19 14	15 30
1, Г-диметил-2, 2'-ди-(3", 4"-метилен диоксифенил)-5, 6; 5', 6'-дибенз-4, 4'-хинокарбоцианин иодид	Etan	768	800	3			694	874—883	35	18
1, Г-диэтил-2, 2'-хинотрикарбоцианин иодид (№ 100)	Etan DMF	823	885	0,7	80	0,4	694 820 694	860-920 860—920 860—920	11 32 19	14 14 14

Продолокение табл. 34.3

КРАСИТЕЛЬ	РАСТВОРИТЕЛЬ	^МАКС _ ПОГЛ	МАКС		(Q ' 10/ ДЖ-1.С-1.СМ3	LO-1" С	V K НМ'	НМ	Т. %	(W - СМ->
3, 3гДиэтил-4, 5; 4', 5'-Ди-(5"-фенил-тиофено-2", 3")-2,2'-тиазолодикарбоцианин иодид (№ 4201)	Etan DMF	730	780	9	43 -у	6	694 730 694	780—810 780—810 784—814	12 19 17	19 19 19
3, 3'-диэтил-4-кето-5-[(3-этиленбензтиазолиилилиден-2)-1, 3-(2,2-диметилтриметилеио)-бутенилидем]-7-ЭТОКСИ-2, 2'-тиазолииотиакарбоцианин бромид (4197)	Etan DMF	725	800	0,5	*27*	0,3	730 694	824—866 824-866 824—866	24 32 7	10 10 10
3, 3'-Диэтил-9, П-(о-феиилено)-2, 2'-тиадикарбоцианин иодид (№ 3734)	Etan DMF	760	815	2	31	3	694 730 694	822—864 822-864 822—864	15 24 23	18 18 18
3, 3'-диэтил-2, 2'-тиатрикарбоцианин иодид (DTTC иодид; № 286)	Etan	763	790	34	74	25	694 750	800-830 800-830	22 42	19 19
3, 3'-диэтил-2, 2'-тиатрикарбоцианин бромид (DTTC бромид)	Etan	765	—	~	—	—	694	820—838	21	18
3, 3'-диэтил-2, 2'-тиатетракарбоцианин иодид (№ 440)	Etan DMF	865	940	0,3	46	0,3	694 820 694	946—980 946-980 946—980	25 49 24	18 18 18
Нильский голубой А-оксазон;(9-диэтиламинобензо [а] феноксазинон-5; оксазин 17)	Etan	550	640	_		_	FL	659—672	0,2	23
Родамин 19	Etan	514	538	_	_	_	FL	564—573	0,2	23

Для возбуждения растворов красителей в импульсном режиме чаще всего используются рубиновый (694 нм, основная частота и вторая гармоника), неодимовый (1060 нм, основная частота, вторая, третья и четвертая гармоники), азотный (337 нм) и ксеноновый (172,5 нм) импульсные лазеры. Генерация может быть осуществлена практически при любой длине волны в диапазоне от 340 до 1100 нм при КПД, достигающем десятков процентов. Ширина спектра составляет 5—50 нм при отсутствии дисперсионных элементов в резонаторе и 10——10-^ им в дисперсионном резонаторе.

Наиболее распространенным источником накачки лазеров на красителях в непрерывном режиме является аргоновый лазер, мощность излучения которого составляет несколько ватт на линиях в синей и зеленой областях спектра. Излучение аргонового лазера фокусируется в область с размерами 10—20 мкм для превышения порога генерации. Для устранения термооптических иска-

жений, а также для выведения из зоны генерации продуктов фотораспада применяется прокачка красителя, чтобы за несколько микросекунд произвести полную смену красителя в активной области. Лазер на красителе с непрерывной накачкой может работать в режиме активной или пассивной синхронизации мод, причем в последнем режиме возможно получение импульсов длительностью с.

Для -перестройки и сужения спектра генерации в лазерах на красителях используются дисперсионные светофильтры и призмы, интерферометры Фабри — Перо, дифракционные решетки, а также селективные элементы, работающие на принципе распределенной обратной связи. В РОС-лазерах обратная связь осуществляется за счет брэгговского отражения излучения от периодической структуры, возникающей в акгизной среде в результате модуляции ее показателя преломления. Введение одного селектирующего элемента сужает спектр генерации примерно до 1 им без существенного снижения выходной мощности Получение более узких линий достигается за счет комбинации нескольких селекторов и сопряжено со значительными потерями выходной мощности.

Более подробные сведения о лазерах на красителях можно найти в обзорах [61—62].

34.8. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ЦЕНТРАХ ОКРАСКИ

Твердотельные лазеры на центрах окраски в ионных кристаллах обладают: широкой областью длин волн генерации 0,7—3,3 мкм, высокой стабильностью частоты и малой шириной генерируемого спектра, возможностью работы в импульсно-периодическом и непрерывном режимах, высоким КПД

Исходным лазерным материалом являются кристаллы фторидов и хлоридов щелочных металлов, а также фториды кальция и стронция. Используются также кристаллы с примесью. Воздействие на кристаллы ионизирующих излучений (-у-квантов, электронов высоких энергий, рентгеновского и коротковолнового ультрафиолетового излучений) или прокалка кристаллов в парах щелочного металла приводит к возникновению точечных дефектов кристаллической решетки, локализующих на себе электроиы или дырки. Стимулированное излучение возникает на электронно-колебательных переходах в таких образованиях. Схема генерации центров окраски аналогична схемам лазеров на красителе.

Все представленные в табл 34.8 непрерывные лазеры, за исключением четырех отмеченных (300 К), работают при температуре жидкого азота. Импульсные лазеры работают при 7"=20 "С.

Более подробную информацию о лазерах на центрах окраски можно найти в [2, 63, 64].

34.10. Лазеры на центрах окраски в ионных кристаллах [63]

Кристалл	Тип центра	Длина накачки, мкм	Область перестройки, мкм	КПД,
		Непрерывные лазеры		
KCl - Li	f^(II)	0,514 0,647	2.3—2,95	9,1
RbCl - Li	f^(II)	0,647 0,676 0,753	2,5—3,33	2,5
KCl - Na		0,47 0,53 0,568	2,25-2,65	2,3
RbCl - Na		0,647 0,676	2,5-2,9	2,1
NaF		0,753	0,89—1,0	10
LiF	(?) (77 K) ***n*** (300 K)	0,647 –	0,82—1,07 0.86-1.0	60 10
KF	***Fl***	1,064	1,22-1,5	46
KCl	***n***	1,34	1,6—1,78	-
NaCl	***F;***	1,064	1,35-1,6	-
LiF	(300 K)	1,064	1,14-1,2	2
NaCl — OH-		1,06	1,36-1,77	-
KCl—OH-	***F;***	1,32 1,34	1,61—1,77	-
KCl-Na	***{II)A***	1,32 1,34	1,62—1,91	4
KCl — Li	***{ptU***	1,32 1,34	2,0—2.5	7
CaFz — Na	(300 K)	0,61	0,72—0,84	-
SrFa — Na	***{F^U***	0,694	0,84—0,98	-
NaF		0,87	0,99—1.22	40
NaF	***{П]***	0,9	1,08—1,38	34
		Импульсные лазеры		
LiF	***P2***	0,45	0,665—0,715	
LiF		0,53	0,65-0,75	
LiF		0,53	0,84-1,1	
LiP-OH-	***FX***	0,69	0,84—1,02	
LiF		1,06	1,08—1.23	
NaF — Li			0,95—1,3	
NaF		0,9b	1,15—1,4	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. I.

2. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1983.

3. Handbook of Lasers//Ed. by R. J Pressley. Cleveland. Chemical Rubber Cotp., 1971.

4. Карлов Н. В.//Справочник по лазерам/Под ред А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 8—11.

5. Beek R., Englisch W., Gurs K. Table of Laser Lines in Gases and Vapors. 3rd. Berlin — Heidelberg — N. Y.: Springer-Verlag, 1980. Vol. 2.

6. Аблеков В. К., Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н. Справочник по газодинамическим лазерам. М.: Машиностроение, 1982.

7. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. акад. И. К- Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

8. Tittel F. K., Wilson W. **L.,** Stickel R. E. e. a.//App1. Phys. Lett. 1980. VoL 36. P. 405—413.

9. Tittel F. K., Marowcky G., Wilson W. **L.,** Williams R. A.//Ibid. 1980. Vol. 37. P. 862—875.

10. Каминский А. А., Мак А. А., Пашинин П. П. и др.//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 237—324.

И. Жариков Е. В., Ильичев Н. Н., Лаптев В. В. и др.//Квантовая электроника. 1983. Т. 10, № 1. С. 140—149.

12. Walling John C.//Laser Focus. 1982. Vol. 18, № 2. P. 45—50.

13. Жариков Е. В., Ильичев Н. Н., Калитин С. П. Препринт ФИ АН Ко 20. М., 1983.

14. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975.

15. Klein P. B., Furneaux J. E., Henry R. L.//Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 42, № 8. P. 638—640.

16. Kunzel W., Durr lJ.//Appl. Phys. 1982. Vol. 328, 2 3. P. 233^-234.

17. Johnson L. F., Guggenheim H. **J.,** Bahnch D.// Opt. Lett. 1983. Vol. 8. № 7. P. 371—373.

18. Ehrlich D. J., Moulton P. F., Osgoord R. M.// Ibid. 1980. Vol. 5, № 8. P. 339—341.

19. Ehrlich D. J.//Top. Meet. Excim. Lasers. Digest Techn. Pap. Charleston, S. C. N. Y. 1979. P. Tn AVi-Tn AV4

20. Каминский А. А.//Докл. АН СССР. 1983. Т. 271, No 6. С. 1357—1359.

21. Allen P.//Rare Earths Modern Science and Technology. N. Y. — Lond.: Plenum Press, 1978. P. 527—532.

22. Hegarty J., Yen W. M.//J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, № 7. P 3545-3547.

23. Kaminskii A. A., Petrosyan A. G., Ovanesyan K.L.//Phys. status solidi (a). 1983. Vol. 77. № 2. P. K 173—K 178.

24. Kaminskii A. A., Asamalyan N. R., Denisenko G. A.//Phys. status solidi, 1982 Vol. A. 70, № 2. P. 397—406.

25. Каминский А. А.//Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер. 1979. Т. 15, № 11. С. 2092.

26. Lenipicki A., McCollum B. C., Chinn S. R.//IEEE J. Quant. Electr. 1979. Vol. 15, N» 9. 896—903.

27. Каминский А. А., Милль Б. В., Сильвестрова И. М.//ИЗВ. АН СССР. Сер. физ. 1983. Т. 47. № 10. С. 1903—1909.

28. Garmash W. M., Kaminskii A. A., Polyakov N. l.l/ Phys. status solidi(a). 1983. Vol. 75, № 2. P. Kil1—KI16.

29. Каминский А. А., Тимофеева В. А., Агамалян Н. В. и др.//Кристаллография 1982. Т. 27, № 3. С. 522—527.

30. Budin J. P., Michel J. e., Auzel F.//J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50, № 2. P. 641—645.

31. Дианов Е. М., Дмитрук М. В., Карасик А. Я.// Квантовая электроника 1980. Т. 7, № 10. С. 2105—2111.

32. Каминский А. А., Кюрстен Г. Д., Шультце Д. и др./7Докл. АН СССР. 1983. Т. 270, № 6. С. 1373-1376.

33. Казаков Б. Н., Орлов М. С, Петров М. В. и др.// Оптика и спектроскопия. 1979. Т. 47, № 6. С. 1217—1219.

34. Каминский А. А., Петросян А. Г., Федоров В. А. и др.//Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1981. Т. 17, № 10. С. 1920-1922.

35. Kaminskii A. A., Sarkisov S. E., Butaeva T. 1. //Phys. status solidi 1979. Vol. 56, N" 2. P. 725—736.

36. Каминский А. А., Федоров В. А., Петросян А. Г. и др.//Изв. АН СССР. Сер. неорг матер. 1979. Т. 15, № 8. С. 1494—1495.

37. Каминский А. А.//Докл. АН СССР. 1981. Т. 260, No 1. С. 64—67.

38. Каминский А. А., Петросян А. Г., Ованесян к. **Л.//ИЗВ.** АН СССР. Сер. неорг. матер. 1983. Т. 119, № 7. С. 1217—1219.

39. Cockaune B.//J. Cryst. Crowth. 1981. Vol. 54, N« 3. P. 407—413.

40. Каминский А. А.//Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1982. Т. 18, 3. С. 482—497.

41. Антипенко Б. М., Мак А. А., Синицын Б. В, и др.//Журн. техн. физ. 1982. Т. 52, № 3. С. 521-522.

42. Каминский А. А.//Кристаллография. 1982. Т. 27, № 1. С. 193—195.

43. Mochalow 1. V.//Phys staius solidi (a). 1979. Vol. 55, № 1. P. 79—87.

44. Каминский А. А., Петросян А. **Г.//113Б.** АН СССР. Сер. неорг. матер. 1982. Т. 18, Л^ 11. С. 1910—1911.

45. Каминский А. А., Павлюк А. А., Бутаева Т. И. и др.//Там же. 1979. Т. 15, № 3. С. 541—542.

46. Каминский А. А., Павлюк А. А., Агапалян И. Р. и др.//Там же. Т. 15, № 8. С. 1496—1497.

47. Каминский А. А., Саркисов С. Э., Сейтранян К. Б. н др.//Там же. 1982. Т. 18, № 3. С. 527—528.

48. Каминский А. А., Сейтранян К. Б., Аракелян А. 3. и др.//Там же. Т. 18, № 6, С, 1061—1063.

49. Каминский А. А., Петросян А. Г.//Там же. Т. 18, №11.С. 1910—1911.

50. Каминский А. А.//Там же. 1983. Т. 19, № 8. С. 1388—1391.

51. Авакянц Л. И., Бужинский И. т., Коряги-на Е. И., Суркова В. Ф.//Квантовая электроника. 1978. Т. 5, № 4. С. 725—752.

52. Бужинский И. М., Дианов Е. М., Мак А. А.// Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова М.: Сов. радио, 1978. Т. I. С. 329—334.

53. Лазерные фосфатные стекла/Н. Е. Алексеев, В. П. Гапоииев. М Е. Жаботинский и др. М Наука 1980.

54. Елисеев П. Г.//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. I. С. 334—

55. Елисеев П. Г. Полупроводниковые лазеры и преобразователи. М.: ВИНИТИ, 1978. (Итоги науки и техники. Радиотехника. Т. 14, ч. 1.)

56. Долгинов Л. М., Елисеев П. Г., Исманлов И./ Инжекционные излучательные приборы на основе многокомпоцентных полупроводниковых твердых растворов. М.: ВИНИТИ, 1980. С. 3-115. (Итоги науки и техники. Радиотехника. Т. 21).

57. Инжекционные лазеры. М.: Наука, 1983. (Тр. ФИАН. Т. 141).

58. Кейси Х., Панниш М. Лазеры на гетероструктуру-1981 Т^^Г 2 Елисеева. М.: Мир,

59. Thompson G. H. B. Physics of Semiconductor Laser Devices. Chichester — N. Y. — Brisbane — Toronto: John Wiley and Sons, 1980.

60. Елисеев П. Г.//Электронная промышленность-1980. № 8—9. С. 50.

61. Степанов Б. И.. Рубинов А. Н.. Мостовников в. А.//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радно, 1978. Т. 1. С. 360—379

62. Каталог активных лазерных сред на основе растворов органических красителей и родственных соединений/Под ред. Б. И. Степанова. Минск: Ин-т физики АН БССР, 1977.

63. Басиев Т. Т., Воронько Ю. К., Миров С. Б. и др.//Изв. АН СССР, Сер. физ. 1982. Т. 46. С 1600—1610.

64. Феофилов П. П., Архангельская В. А.//Там же. 1981. Т. 45. С. 302—308.

Глава 35
РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Р. М. Имамов

35.1. ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновским излучением называют электромагнитные колебания с длиной волны от 10-' до 10 им. Чрезвычайно малые длины волн рентгеновского излучения, соизмеримые с межатомными расстояниями в твердых и жидких телах, обусловливают своеобразные свойства этого излучения. Показатель преломления рентгеновского излучения определяется выражением

<7=1—

где ***N*** — число электронов в 1 см'; Я- — длина волны, см; е и m — заряд и масса электрона. ,

Так как eV1^c^)=2,8-10-" см, см, N^ -XQi^—lCF' см®, то порядок второго члена в выражении для 9 меньше 10-^. Таким образом, для рентгеновского излучения ***q*** меньше единицы, хотя и мало отличается от нее.

Ввиду близости ***q*** к единице рентгеновское излучейие фокусировать с помощью лнпз и призм практически невозможно. В рентгеновской оптике пучки формируют чаще всего с помощью диафрагм либо зеркал с полным внешним отражением. Используются также дифракционные методы фокусировки пучков.

Источником рентгеновского излучения служит электронная рентгеновская трубка. В ней электроны, испускаемые накаленным катодом (вольфрамовой нитью или спиралью), ускоряются электрическим полем н направляются на металлический анод. Энергия электронов при их резком торможении в веществе анода преобразуется в фотоны рентгеновского излучения:

^Фотона = /r^ = – Яа,

где ***h*** — постоянная Планка; v — частота излучения; £i и £2 — энергия электронов соответственно до и после соударения с анодом. Возникающее излучение состоит обычно из тормозной и характеристической составляющих. Максимальная частота Vmax или минимальная длина волны Т-шт соответствует полной остановке электронов (£2=0):

Ьщах = ***hdl-rnin*** =

где и — ускоряющее напряжение, кВ; ?i,min= 1,24/1/, нм.

Поскольку Ег может принимать любое значение, меньшее £1, то непрерывный спектр со стороны длинных вачи ограничен лишь поглощением длинноволнового излучения в материале окна трубки и в воздухе. Максимальной интенсивности в сплошном спектре соответствует длина волны спектра ^»1,5>.mtn.

В качестве мощного источника рентгеновского излучения в последнее время используют синхротронное, или магинтотормозное, излучение, возникающее при движении селятивистских заряженных частиц в однородном магнитном поле. Спектр синхротронного излучения практически непрерывно заполняет диапазон от нч)раКрасНого до высокоэнергетического рентгеновского излучения. Направление излучения совпадает с мгновенной скоростью заряженной частицы и сосредоточено в конусе с углом раствора ***в—ЕЦmc^),*** где ***Е*** — энергия заряженной частицы, ***m*** — ее масса, с — скорость света.

Для измерения энергии рентгеновского излучения согласно РД 50-454—84 рекомендуется применять внесистемную единицу электрон-вольт. В соответствии с ГОСТ 8.417—81 единица электрон-вольт и десятичные кратные ей единицы допускаются к применению без ограничения срока наравне с единицами СИ:

X = — = /гс/£;

Е (1 = 1 нм)=/гс/10-9 м= 1239,851 9(32) эВ;

X (Е = 1 эВ) = ***hell*** эВ = 1239,851 9 (32) нм.

Ниже приведены соотношения между рекомендованными и внесистемными единицами:

=0,100202 нм;

1 R y = 13,605802 эВ;

~(£ = 1 эВ) = 1 эВ/Лс = 8065,479 см-i.

35.2. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ СПЕКТР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Характеристический спектр возникает при определенном ускоряющем напряжении ***U,*** зависящем от атомного номера ***Z*** материала анода. Появление характеристического спектра легко объяснить на основании квантовомеханических представлений о строении атома.

Ускоренные в трубке электроны могут «выбить» тот или иной внутренний электрон атома анода Возникнорение электронной вакансии переводит атом в возбужденное состояние. Возвращение атома в невозбужденное состояние сопровождается выделением избытка энергии в виде кванта рентгеновского излучения hv=Ei—Eoi где ***Е,*** — энергия электронов внешних оболочек, а £0 — энергия электронов внутренних оболочек.

В рентгеновской спектроскопии приняты следующие

обозначения [1]. Термы уровней атома, для которых главное квантовое число равно 1, 2, 3, 4, 5 и 6, обозначаются соответственно буквами ***K. L. M. N. O. P.*** Индексы у этих букв соответствуют разным значениям орбитального и полного момента электрона согласно схеме:

Уровень электрона в атоме	Is	***2s***	2Pl/2	2Pз/2	3s	***3Pi/2***	***3Pз/2***	***Щ2***	***Щ2***	и т. д.
Терм уровня	***K***	Lj	i-ll	i-III	M,	***Мп***	***Щи***		***Му***	и т. д.

Линии, соответствующие переходам электрона в атоме на ***K-, L-, M-,*** iV-оболочки, образуют ***K-, L-, M-,*** ЛГ-серии рентгеновского излучения. Линии, возникающие при переходах по такой простой диаграмме уровней, называют диаграммными линиями.

Частота какой-либо линии v, Гц, изменяется при переходе от одного элемента к другому по закону Мозли:

$$\nu = R_{oc}(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right),$$

где R_{oc} =109737,3 см"' — постоянная Ридберга; с — скорость света; n — главное квантовое число (здесь индекс О относится к конечному, а 1 — к исходному состоянию электрона); о — постоянная экранирования.

При постоянном анодном токе интенсивность характеристического излучения ***Ic*** растет пропорционально $(U - U_{кр})^n$, где $U_{кр}$ — порог возбуждения линии. Максимум отношения интенсивности характеристического излучения к интенсивности сплошного спектра достигается при $U = 3\ U_{кр}$.

Таблица 35.1. Обозначение диаграммных линий рентгеновского излучения [2]

K-серия		L-серия				Л^-серия	
Переход	Индекс	Переход	Индекс	Переход	Индекс линии	Переход	Индекс
K-L„		***L-M„***	P4	L n - O i v	Te		T
K - L n i	~1		Pз		***I***		в
/C-Л1„	?3		PlO	Ljii - M ц	-	VMJV A'vi, V, II	p
к - м , , .	s,		p9		s	Oil,	***'П***
		L, - i V „	T2	^ n – Щ у	«2	***My*** - .v„	
K-My		i-l - ^ n i	T3				
V	***h***	***L,*** - 0 „	T4	***Lni-My***	~1	Щ - ^ П , III	S
		Li – o„,	T4		Pe	***M y - N y ,***	~2
		L l - P u . lll	Ti3			^ v "•'^VII	~1
к — ATjjj		Lji-VM,	'i	***hu—^iv***	P,5		
III	P.		Pi	^ - i n - ^ v	P2		
	Pc.		Y5	^ H l – ^^Vl. VII	p;		
K - N y	P4	***hi*** — ^ I V	Ti	^ - l i i - O i	p.		
		L„ - 0,	T8	^ I I I – ^ I V , V	P5		

Таблица 35.2 Длина волны диаграммных линий [3] при начальном уровне K

Элемент	Длина ïЗЛНЫ Л НМ при конечно!•1 уровне						Край поглощения
	Lj		^iii				
	-				3i		
		22,8					22,65
^Be	—	II, 4					11,10
		6,76					–
"C		4,47					4,368
'N		3. 16					3,099
Ю	—	2,362					2,332
op		1,832					1,800
me		1,4611		1,445			1,430
uNa		1,1910		1.,1575			1,1569
imq		0,98i)0		0,9521			0,9512
ИА1		0,8342	0,8339	0,7961			0,7948
MSi		0,7128	0,7125	0,6753			0,6738
ıcp		0,6160	0,6157	0,5796			0,5784
16S		0,5375	0,5372	0,5032			0,5019
"CI		0,4731	0,4728	0,4403			0,4397
wAr		0,4195	0,4192	0,.3t386			0,3871
ИК		0,3745	0,3741	0,3454		0,3441	0,3437
2«Ca		0,3362	0,3358	0,3090		0,3075	0,3070
«Sc		0,3034	0,3031	0,2780		0,2763	0,2762
22Ji		0,2752	0,2749	0,2514		0,2499	0,2497
гзу		0,2507	0,2504	0,2284		0,2270	0,2269
^^Cr		0,2294	0,2290	0,2085		0,2071	0,2070
		0,2106	0,2102	0,1910		0,1JS97	0,1896
26Fe		0,1940	0,1936	0;.1757		0,1744	0,1743
2'Co		0,1793	0,1789	0,.1621		0,1609	0,1608
28Nj		0,1662	0,1658	0,,1500		0,1'}89	0,1488
29CU		0,1544	0,1541	0,.1392		o,i;582	0,1381
MZn		0,1439	0,1435	0,.1295		0,1285	0,1283
WGa		0,1344	0,1340	0,1208	0,1207	0,1198	0,1196
з^Oe		0,1258	0,1254	0,1129	0,1128	0,1119	0,1117
33As		0,1180	0,1176	0,1058	0,1057	0,1049	0,1045
MSe		0,1109	0,1105	0,0993	0,0992	0,0!384	0,0980
35Br		0,1044	0,1040	0,0933	0,0932	0,0926	0,0920
BCTr		0,0984	0,0980	0,0879	0,0878	0,0871	0,0866
s'Rb		0,0930	0,0926	0,0829	0,0828	0,0822	0,0816
		0,0879	0,0875	0,0783	0,0782	0,0776	0,0770
3SY		0,0833	0,0829	0,0741	0,0740	0,0735	0,0728
«Zr		0,0790	0,0786	0,0702	0,0701	0,0(396	0,0689
"Nb		0,0750	0,0746	0,0666	0,0665	0,0(360	0,0653
Щ\o		0,0714	0,0709	0,0633	0,0632	0,0627	0,0620
«Tc		0,0679	0,0675	0,0602	0,0601		0,0589
		0,0647	0,0643	0,0573	0,0572	0,0568	0,0561
«ïRh		0,0618	0,0613	0,0546	0,0545	0,0541	0,0534
«Pd		0,0590	0,0585	0,0521	0,0520	0,0516	0,0509
"Ag		0,0564	0,0559	0,0498	0,0497	0,0493	0,0486
««Cd		0,0539	0,0535	0,0476	0,0475	0,0471	0,0464
4Ð In		0,0516	0,0512	0,0455	0,0454	0,0451	0,0444
6»Sn		0,0495	0,0491	0,0436	0,0435	0,0432	0,0425
^Sb		0,0475	0,0470	0,0418	0,0417	0,0414	0,0407
62Te		0,0456	0,0451	0,0401	0,0400		0,0390
63,	—	0,0438	0,0433	0,0385	0,0384		0,0374
"Xe		0,0421	0,0416	0 0369	0,0368		0,0358
^•Cs		0,0405	0,0400	0,'0355	0,0354		0,0345
6«Ba	–	0,0390	0,0385	0,0342	0,0341	o,o:Й8	0,0331
6'La	–	0,0375	0,0371	0,0329	0,0328	0,0325	0,0318
	–	0,0362	0,0357	0,0317	0,0316	0,0313	0,0306
бфГ	–	0,0349	0,0344	0,0305	0,0304		0,0295
««Nd	–	0,0336	0,0332	0,0294	0,0293		0,0285
"Pm		0,0325	0,0320	0,0284	0,0283		0,0274
«^Sm	_	0,0314	0,0309	0,0274	0,0273	0,0271	0,0265

Продолжение табл. 34.3

йлемент	л, нм, при конечном уровне					^ . v	- V	Край поглощения
	–		a.	Pr				
««Eu		0,0303	0,0298	0,0264	0,0263			0,0256
MGd	.—	0,6293	0,0288	0,0255	0,0254	0,0243		0,0247
«6Tb	.—	0,0283	0,0279	0,0247	0,0246			0,0238
6<ìDy	–	0,0274	0,0269	0,0239	0,0238	o ,o : Й6		0,0230
«"Ho		0,0265	0,0261	0,0231	0,0230	o ,o : 228		0,0223
C8Er		0,0257	0,0252	0,0223	0,0222	0 ,0221		0,0216
»8Tm		0,0249	0,0244	0,0216	0,0215	0,0214		0,0209
70Yb		0,0241	0,0237	0,0209	0,0208	0,0207		0,0202
"Lu		0,0234	0,0229	0,0203	0,0202	0,0200		0,0196
!2Hf	–	0,0227	0,0222	0,0197	0,0196			0,0190
"Ta	—.	0,0220	0,0215	0,0191	0,0190	0 ,0 188		0,0184
74W	0,0216	0,0214	0,0209	0,0185	0,0184	0,0183		0,0178
	—.	0,0208	0,0203	0,0179	0,0178	0,0177		0,0173
'«Os	–	0,0202	0,0197	0,0174	0,0173	0,0172		0,0168
"Ir		0,0196	0,0191	0,0169	0,0168	0,0167		0,0163
78pt		0,0190	0,0186	0,0164	0,0163	0,0162		0,0158
«Au		0,0185	0,0180	0,0159	0,0158	0,0158		0,0154
coHg	–	0,0180	0,0175	0,0155	0,0154	0,0153		0,0149
IlT1	–	0,0175	0,0170	0,0151	0,0150	0,0149		0,0145
82pb	–	0,0170	0,0165	0,0146	0,0145	0,0145		0,0141
83Bi	–	0,0166	0,0161	0,0142	0,0141	0,0141		0,0137
84po		0,0161	0,0156	0,0139	0,0138			
e6At		0,0157	0,0152	0,0135	0,0134			
««Kn		0,0153	0,0148	0,0131	0,0130			
"Er		0,0149	0,0144	0,0128	0,0127			
88Ra	–	0,0145	0,0140	0.0124	0,0123			
	–	0,0141	0,0136	0,0121	0,0120			
s®Th	–	0,0138	0,0133	0,0118	0,0117	0,0116		0,0113
»ipa	–	0,0134	0,0129	0,0115	0,0114			
	—	0,0131	0,0126	0.0112	0,0111	0,0110		0,0107

Таблица 35.3. Длина волны X, нм, L-серии диаграммных линий [3]

Начальный уровень L	Конечный уровень	Lj -край поглощения	Начальный уровень	Конечный уровень	^11 - поглощения	Начальный уровень	Конечный уровень
"Na	37.6		40,71		40,50	40,71	
	31.7	19,37	25,15		24,93	25,15	
	29,0	14,25	17,14		17,04	17,14	
"Si			13,53		12,30	13,55	
16p			10,38		9,40	10,38	
l6S			8,340			8,340	
I'Cl			6.733			6,790	
isAr			5,590			5,630	
iPK			4,724		4,210	4,774	
2«Ca			4,046	3,594	3,513	4,096	3,633
2iSc			3,513	3,102		3,559	3,135
22Ti			3,089	2,705	2,729	3,136	2,742
23V	2,189		2.734	2,388		2,777	2,425
24Cr	1,943	1,67	2,430	2,127	1,790	2,478	2,164
	1,758		***2,185***	1,911		2,229	1,945
	1,570		1,975	1,726	\~***720***	2,015	1,759
"Co	1,427		1,787	1,567	1,562	1,829	1,597
2SNi	1,316		1,627	1,427	1,424	1,669	1,456

Продолжение табл. 36.5

Элемент	Начальный уровень L^			Jlj -край поглощения	Начальный уровень		^..-край поглощения	Начальный7/ уровень ^ИГ		^„„-край поглощения
	Конечный уровень				Конечный уровень			Конечный уровень		
						• ^ v				
	-	P4	Ps		•>1	Pi		1	"1,2	
29CU	—	1,210			1,490	1,305	1,301	1,525	1,334	1,329
3«Zn	—	1,119		1,^6	1,368	1,198	1,186	1,402	1,225	1,213
"Ga	—	1,037		0,952	1,260	1,102	1,083	1,295	1,129	1,110
		0.964 il	0.958	0,877	1,161	1,018	0,992	1,194	1,044	1,019
a^As		0,8!93		0,811	1,073	0,941	0,913	1,107	0,967	0,937
34Se		0,832		0,750	0,996	0,874	0,841	1,029	0,899	0,865
SSBr		0,777		0 696	0,926	0,813	0,775	0,959	0,837	0,798
зекг		0,730	0,726	0^647		0,758	0,717		0,782	0,739
f'Rb		0,682	0,679	0,601	0,804	0,708	0,664	0,836	0,732	0,686
fssr		0,640	0,637	0,559	0,752	0,662	0,617	0,784	0,687	0,639
39Y		0,602	0,598	0,522	0,704	0,621	0,576	0,736	0,645	0,596
	—	0,567	0,563	0,488	0,661	0,584	0,538	0,692	0,607	0,558
«Nb	—	0,535	0,531	0,458	0,621	0,549	0,503	0,652	0,573	0,523
mo		0,505	0,501	0,430	0,585	0,518	0,472	0,615	0,541	0,491
«Tc	—	—	—	0,406		0,489	0,444	—	0,511	0,463
«Ru	—.	0,452	0,449	0,384	0,521	0,462	0,418	0,550	0,485	0,437
	—	0,429	0,425	0,363	0,492	0,437	0,394	0,522	0,460	0,413
«Pd	—	0,407	0,403	0,344	0,466	0,415	0,372	0,495	0,437	0,391
«Ag	—	0,387	0,383	0,326	0,442	0,393	0,353	0,471	0,415	0,370
«Cd	—	0,368	0,364	0,308	0,419	0,374	0,333	0,448	0,396	0,350
49In	—	0,351	0,347	0,293	0,398	0,356	0,315	0,427	0,377	0,332
»Sn	—	0,334	0,341	0,278	0,379	0,339	0,298	0,407	0,360	0,316
"Sb	—	0,319	0,315	0,264	0,361	0,323	0,283	0,389	0,344	0,300
62Te	—	0,305	0,301	0,251	0,344	0,308	0,269	0,372	0,329	0,286
63I	—	0,291	0,287	0,239	0,328	0,294	0,255	0,356	0,315	0,272
	—	—	—	0,227	—	—	0,243	—	0,302	0,259
Ii^Cs	—	0,266	0,263	0,217	0,299	0,268	0,231	0,327	0,289	0,247
siiBa	—	0,256	0,252	0,207	0,286	0,257	0,220	0,314	0,278	0,236
"La	—	0,245	0,241	0,198	0,274	0,246	0,211	0,301	0,267	0,226
seCe	—	0,235	0,231	0,189	0,262	0,236	0,201	0,289	0,256	0,217
иpr		0,226	0,222	0,181	0,251	0,226	0,193	0,278	0,246	0,208
»Nd	—	0,217 -	"07213	0,174	0,241	0,217	0,184	0,268	0,237	0,200
иPт	—	—	0,204	0,167		0,208	0,177		0,228	0,192
"v'Sm	—	0,200	0,196	0,160	0,222	0,200	0,169	0,248	0,220	0,185
e^Eu	—	0,193	0,189	0,154	0,213	0,192	0,163	0,239	0,212	0,178
"Gd	—	0,185	0,182	0,148	0,205	0,185	0,156	0,231	0,205	0,171
e-Tb	—	0,179	0,175	0,142	0,197	0,178	0,150	0,224	0,198	0,165
oeOy	—	0,172	0,168	0,137	0,190	0,171	0,144	0,216	0,191	0,159
"Ho	—	0,166	0,162	0,132	0,183	0,165	0,139	0,209	0,185	0,154
N6Er	—	0,160	0,156	0,127	0,176	0,159	0,134	0,202	0,179	0,148
^Tm	—	0,154	0,151	0,123	0,170	0,153	0,129	0,196	0,173	0,143
'IOAb	—	0,149	0,145	0,118	0,164	0,148	0,124	0,189	0,168	0,139
"Lu	—	0,144	0,140	0,114	0,158	0,142	0,120	0,184	0,163	0,134
»Hf	—	0,139	0,135	0,110	0,152	0,137	0,115	0,178	0,158	0,130
'3Ta	—	0,135	0,131	0,106	0,147	0,132	0,111	0,173	0,153	0,126
74W	—	0,130	0,126	0,102	0,142	0,128	0,107	0,169	0,148	0,122
'»Re	—	0,126	0,122	0,099	0,137	0,124	0,104	0,163	0,144	0,118
™0s	—	0,122	0,118	0,096	0,133	0,119	0,100	0,158	0,140	0,114
"Ir		0,118	0,114	0,092	0,128	0,116	0,097	0,154	0,136	0,111
78pt		0,114	0,110	0,089	0,124	0,112	0,093	0,150	0,132	0,107
«Au		0,111	0,107	0,086	0,120	0,108	0,090	0,146	0,128	0,104
80Hg		0,107	0,103	0,084	0,116	0,105	0,087	0,142	0,125	0,101
"T1		0,104	0,100	0,081	0,113	0,101	0,084	0,138	0,121	0,098
82pb	—	0,101	0,097	0,078	0,109	0,098	0,082	0,135	0,118	0,095
	—	0,098	0,094	0,076	0,106	0,095	0,079	0,132	0,115	0,092
8фo	—	0,097	0,091			0,092		0,128	0,112	
85At	—	—	0,088			0,089			0,109	
««Rn	—	—	0,085	—	—	0,087	—		0,106	—
8'Er	—	—	0,083	—	—	0,084	—	—	0,104	—

Продолокение табл. 34.3

Элемент	Начальный уровень L^			поглощения	Начальный уровень		"II-Krafi поглощения	Начальный уровень Чп		НОЛощения
	Конечный уровень				Конечный уровень			Конечный уровень		
			" i n			^ I V				
	-				••f	Pi		1	"1.2	
SSRa		0,084	0,080	0,065	0,091	0,081	0,067	0,117	0,101	0,080
8»Ac			0,078			0,079	–	–	0,099	
90Th		0,079	0,075	0,061	0,085	0,077	0,063	0,112	0,096	0,076
9iPa		0,077	0,073		0,083	0,074	–	0,109	0,094	–
92IJ		0,075	0,071	0,057	0,081	0,072	0,059	0,107	0,092	0,072
93Np		0,073	0,069	–	0,078	0,070	–	0,104	0,090	–
94pu		0,071	0,067	0,054	0,076	0,068	0,056	0.102	0,0й8	0,069
96Am		0,069	0,065			0,066		0,100	0,086	

35.4. ШИРИНА ЛИНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В соответствии с принципом неопределенности энергетические уровни (термы) имеют конечную ширину. Это приводит к наличию некоторого «разбега» по энергиям у квантов одной и той же спектральной линии. Для самой линии характерна конечная ширина, соизмеримая с междублетным расстоянием. Значения ширины ярких линий на половине высоты приведены в табл. 35,4, Это величины непосредственно определяются шириной валентной зоны.

Таблица 35.4. Значения ширины ярких линий рентгеновского излучения на половине высоты ДХ, нм [3]

Элемент	К-лчниЯ начального уровня				L-линия начального уровня		Л)-линия начального уровня
	a.	«2	fi.				
	1,38	1,90					
23V	1,58	2,21					
24Cr	! ,96	2,43					
26MI	2,46	2,96					
2вре	2,65	3,00		—			
"Co	2,45	3,12					
	2,26	3,03		–	–	–	–
29Cu	2,31	3,21					
sozn	2,44	2,90					
3iGa	2.Ю	2,55i	–	–	–	–	–
зЮе	2,73	2,94	–	–	–	–	–
		4,6					1,52
30Y							0,44
'«Zr	5,2	5,4			1,94	1,97	0,827
4'Nb	5,8	5,4			1,94	2,12	1,24
«Mo	5,86	6,18			1,95	2,21	1,63
o^Ru	6,8	6,7		–	2,55	2,83	2,49
	7,3	7,2		–	2,54	2,87	3,77
«Rd	7,8	7,9	—	–	2,94	2,97	7,26
«Ag	8,5	8,7	–	–	3,16	2,74	10.24
««Cd		–	—	–	2,81	3,50	–
	—	—	11,7	11,5	—		—

Продолжение табл. 35.4

Элемент	У<-линия НА4АЛЬШЕГО уровня				L-л.шия уровня		M-линия начального уровня
			Зз	-			
"Sb	10,6						
52xe	11,0	14.0					
531	10,7	15.1					
65Cs	15,0	15,1	17,7	14,6	–	—	—
5eBa	15,2						
s'La		17,2					
6sCe	12,8	17,0	18,8	**17,3**	–	–	–
eoNd	14,4	21,2					
«^Sm	23,9	24,2	27,5	24,7	–	–	–
«Ей	–	22,2					
"Gd	27,0	26,4					
65Tb		24,6	33,2	33,0			
	27,9	26,1					
	30,2	28,8	33,5	34,0			
68Fr		29,5					
	—	36,9	—	—	-		—
70Yb	40,4	32,5	44,0	37,8	–		
"Lu	39,3	39,8					
72Hf		38,7		–	–	–	–
'3Ta	42,4	36,4	44,9	**49,3**	–	–	–
'«W	43,2	37,4					
'sRe	46,4	52,9					
«Os	55,0	50,9					
"Ir	53,0	50,3					
jgpt	58,0	63,3					
'»Au	55,5	56,7	:				
soHg	64,0	68,5					
81T,	–	78.2					
ВГРЬ	65,5	68,7					
s'Bj		83,5					
90Xh	95,0	92,6					
	105,0	107,5	—	—	–	–	–
MNP	98,5	**103,9**	–	–	–	—	—
MPH		**114,0**					
«"Am	115,0						

Таблица 35.5. Относительная интенсивность линий *K-* и L-серий (в процентах интенсивности соответственно /(„l-линий, для Ar—Ca—от дублета Kai + и Lai-линий, для K—Co—от дублета Lai + L^i)

	Зi	Pa				*I*	
	10,3		—	—	–	—	
	12,2		–	–		–	
	12,8				100	250	
50,7	20,0				100	250	
50,2	19,8	0,44			100	165	
50,7	20,5	0,45	–		100	250	
50.5	17,9	0,43	–		100	77	
50.0	22,4	0,34	–		100	100	
50.6	16,7	0,21	–		100	80	
50.2	16,0	0,14	–		100	75	
50.7	18,7	0,20	–	–	–	–	
50,7	20.0	0,15	–	–	–	–	
51.3	20,7	–	0,36	–	–	–	
50,7	21,6	–	–	–	–	–	
51,2	24,0	-	1,32	–	–	–	
43.2	21,7	–	0,69	-	–	–	
52.3	21,0	–	1,07	–	–	–	
50,9	22,2	–	1,73	–	–	–	
	17,2	–	–	–	–	–	
51,0	23,9	–	2,5	–	–	–	
52.1	27,4	–	4,16	–	–	–	
52.3	23,3	–	3,19	–	–	–	
52.4	24,9	–	3,70	100	12,0	3,5	0,6
52,6	27,9		4,90	100	14,0	4,0	0,7
52.5	26,5	–	4,30	100	11,0	2,4	
51.1	29,3	–	5,63	100		–	
52.5	27,6	–	4,60	100	–	–	
52.6	29,0	–	6,13	100	–	–	
52.2	>8,4	–	4,9	100	–	–	
54,4	29,7	–	6,42	100	–	–	
53,9	29,6	–	6,47	100	–	–	
54.1	29,8	–	5,5	100	–	–	
51.7	31,0	–	7,08	100	–	–	
52.7	30,6	–	7,35	–	–	–	
53,6	30,1	–	6,0	–	—	—	
54,0							
55.2	30,4	Z	7,1	Z	z		
56.4				100	11,4	–	
50.8	30,3	—	8,0	100	9,8	4,7	
53,0					11,0	–	
53,2				100	10,4	–	
54.0	32,1	–	7,5	100	8,5	4,8	0,66
54.9							
56,9	3Г0	—	8,7	100	12,5	5,2	
56,2		–		100	11,5	2,64	
55.1				100	10,3		
56,0	32,0		8,8	100	11,6	5,5	0,57
52.2				100	11,5	–	
57.6				100	11,3	3,11	
58.7	32,7		8,9	100	11,9	–	
58.5				100	11,7	3,48	
57,1				100	11,6	3,06	
55.4	12,5 | 24,3	0,57	7,8	100	12,0	5,7	1,2
57.8	13,3 | 24,8	0,56	8,5	100	11,7	3,38	1,2
58,7	12,8 | 24,6	0,57	8,5	100	11,7	–	1.8
	12,9 | 25,0	0,69	8,9	100	11,1	–	
57J	12,7 | 24,3	0,64	7,8	100	11 ,5	6,0	1.4
56.3	12,9 | 24,6	0,69	9,0	100	11,8	–	1.5
58.5	13,2 | 25,8	0,77	8,8	100	11 ,5	6.0	1,3
59.5	13,1 | 26,6	0,72	10,0	100	11 ,0	–	1,3
57.4	13,9 | 25,7	0.65	10.1	100	10,5	–	1,7
59.6	14,0 | 26,2	0,74	10,0	100	11,9	4,1	1,7

Продолокение табл. 34.3

Элемент	/С-Серия					L-Серия				
	~2	Зз		Р.	Рг		~а		Тб	й 2,15
«Bi	59,9	*16,4*	26,8	0,~0	10,0	100	11,3	6,3	1,8	24,0
90Tn	61,0	14,0	28 4	0,98	11,8	100	10,7	7,2	1,9	28,4
мРа			–	–	–	100	10,9	–	–	24,0
92U	61,0	14,0	*27,&*	0,98	12,0	100	10,6	4,5	1,7	26,8
MNp	63,5			—.	–	—•	—•	–	–	–
	63,0		–	—.	–	100	10,2	–	1,7	24,9
	61,9		-	—	–	–	–	—	–	—
9вСт	63,2	11,2	23,0	–	–	–	–	'—•	–	–
9'Вк	64,3	12,6	22,2	–	–	–	—•	–	–	–
98Cf	65,7	13,3	25,9	—•	–	–	–	–	–	–
""Es	66,6	13,4	24,2							

35.5. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ

Интенсивность линяй рентгеновского излучения определяется силой осциллятора и частотой соответствующего перехода, а также статистическим весом уровня атома. Вычисление сил осцилляторов представляет собой трудоемкую задачу. По данным экспериментальных исследований для излучения К-серии интенсивность определяется уравнением /=x£(t/—L'„p)'', где t/кр — порог возбуждения серии; ***i*** — ток, проходящий через трубку; и — подаваемое напряжение; показатель r= 1,6-^-2; X — эмпирический параметр. Относительная интенсивность линий спектра определяется вероятностью перехода между уровнями. Для наиболее часто используемой ***К-серкк*** отношения 1о\: ***Ii2- I***t = = 10:5:2, а отношение Яс :Лз =1,09. Значения относительной интенсивности линий К и L-серий приведены в табл. 35.5 [2, 3].

35.6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом сопровождается вторичным излучением, возникающим в процессе прямого вырывания электронов из атома ***(фотоэффект)*** и последующего отрыва внешних электронов в ходе заполнения внутренних электронных оболочек. Перестройке электронных оболочек сопутствует и.члучение рентгеновских квантов с меньшей энергией ***(флуоресцентное излучение),*** или так называемого ожеэлектрона ***(вторичный фотоэффект).*** Прямое взаимодействие рентгеновского излучения с электронами внешних оболочек приводит к возникновению комптоновских электронов. Ко вторичному излучению относится и рентгеновское излучение, неупруго рассеянное на тепловых колебаниях кристаллической решетки. В некоторых случаях при облучении кристалла рентгеновским излучением наблюдается люминесцентное излучение. Все эти процессы ответственны за поглощение рентгеновского излучения. В результате этих процессов и упругого рассеяния интенсивность первичного пучка /о при прохождении сдоя вещества толщиной ***t*** уменьшается по экспоненциальному закону:

$$/ = /_{„} \; exp(-\hat{}0,$$

где (X — линейный коэффициент ослабления, см-'. Если вещество состоит из атомов одного сорта, то полезно ввести так называемый массовый коэффициент ослабления см^''/г, где р — плотность, г/см®.

Коэффициент ослабления пропорционален приблизительно а также 2®; по мере уменьшения длины волны рентгеновского излучения падает и ц. Однако при некоторых значениях волны (Хкр) коэффициент ослабления резко возрастает (край полосы поглощения), а затем вновь убывает с уменьшением длины волны по тому же закону.

Для сложного химического вещества линейный коэффициент ослабления можно выразить через массовые концентрации с,- и массовые коэффициенты Цщ- элементов, образующих данное соединение: (x=p f^-m, где суммирование производится по всем элементам, входящим в сложную молекулу.

Значения массового коэффициента ослабления для /С-линий излучающих элементов, широко используемых в исследованиях, приведены в табл. 35.6 [3].

Таблица 35.6. Значения массового коэффициента ослабления (^т, см^/г, для К„ /Ср - линий различных излучателей [3|

i l l	CrK^j							Ni Kp,	Cu Ko^i	cu Kp,		M0K3,
"Li	1,77	1,35	1,08	0,816	0,861	0,646	0,689	0,514	0.557	0,414	0,058	0,270
«Be	4,28	3,25	2,62	1,97	2,08	1,56	1,67	1,24	1,35	1,0	0,240	0,223
	8,49	6,46	5,20	3,92	4,13	3,10	3,31	2,49	2,67	1,99	0,360	0,290
«C	14,9	11,3	9,10	6,86	7,23	5,42	5,79	4,32	4,67	3,47	0,555	0,445
'N	28,9	18,1	14,6	11,0	11,6	8.70	9,29	6,93	7,50	5,58	0,820	0,626
IO	35,9	27,3	22,0	16,6	17,5	13,10	14,0	10,4	11,3	8,40	1,17	0,884
9Fe	51,6	39,2	31,6	29,8	25,1	18,80	20.1	15,0	16.2	12,0	1,68	1,20
i«Ne	71,3	54,2	43,7	32,9	34,7	26,0	27,8	20.7	22,4	16,7	2,33	1,60
I'Na	97,0	74,7	60,7	46,3	48,7	37?0	39.4	30,0	32,1	24,2	3,40	2,18
i^Mg	123	94,7	77,0	58,7	61,8	46,9	50,0	37,8	40,8	30,7	4,57	2,95
«Al	153	118	95.8	73,1	76,8	58,4	62,1	47,0	50,7	38,2	5,21	3,68
MSi	187	144	117	89,5	94,1	71,5	76,1	57,6	62,1	46,7	7,12	4,80
15p	226	174	142	108	114	86,3	91,8	69,5	74,9	56,4	8,30	5,73
tfS	270	208	196	129	135	103	110	82,9	89,4	67.3	10,3	7.29
I'Cl	318	245	199	152	160	121	129	97,8	105	79,4	12.1	8,60
>SAr	372	286	233	178	187	142	151	114	123	92,8	13,5	10,0
ИК	407	317	260	201	211	162	172	132	142	108	17,3	11,9
2»Ca	462	360	296	228	240	184	196	150	161	123	20,5	13,8
a s c	521	406	333	258	270	208	221	169	182	139	23,1	16,0
S2Ti	585	456	374	289	303	233	248	190	204	156	25,9	18,0
e3y	79,9	509	418	323	338	260	276	212	228	174	28,9	20,0
s^Cr	90,4	70,1	464	358	376	289	307	235	253	193	32.1	22,2
	102	79,0	64,6	396	416	320	340	260	280	213	34,8	24,3
26Fe	!14	88,5	72,4	55,7	58,5	353	374	287	308	235	39,1	27,8
	127		80,8	62,2	65,3	50,0	53,2	315	338	258	42,9	32,0
S8Ni	141	n o '	89,8	69,1	72,5	55,6	59,1	45,1	48,5	282	47,0	35,1
ssQi	156	121	99,4	76,5	80.3	61,5	65.4	49,9	53.7	40,8	51,2	39,0
'«Zn	173	134	110	84,4	88,6	67,9	72,2	55,1	59,2	45,0	55,7	43,5
siGa	190	147	121	92,8	97,5	74,7	79,4	60,6	65,1	49,5	60,4	48,0
s^Ge	208	162	132	102'	107	81,9	87,0	66,4	71,4	54,3	65,5	51,0
As	228	177	145	111	117	89,5	95,1	72,6	78,1	59,3	70,5	55,0
	248	193	158	121	127	97,6	104	79,9	85,1	64,7	75,8	61,0
85Br	270	210	172	132	139	106	113	86,1	92,6	70,4	81,5	66,0
36Kr	293	227	186	143	150	115	122	93,4	100	76,4	87,4	70,0
s'Rb	317	246	201	155	163	125	132	101	109	82,6	90,0	77,0
38Sr	342	266	217	167	176	135	143	109	117	89 2	96,0	83,0
39Y	369	286	234	180	189	145	154	118	126	96 Л	100	89,0
^"Zr	397	308	252	194	204	155	166	127	136	103	16,7	95,0
«Nb	426	331	271	208	219	168	178	136	146	111	18,0	100
«Mo	456	354	290	223	234	180	191	146	157	119	19,3	14,6
«Tc	488	379	310	239	251	192	204	156	168	127	20,7	15,5
"Ru	522	405	332	255	268	205	218	167	179	136	22,0	16,0
«Rh	557	432	354	272	286	219	233	178	191	145	23,5	17,5
«epd	593	460	377	290	304	233	248	189	204	155	24,5	18,5
«Ag	631	480	401	309	324	248	264	201	217	165	26,6	19,5
	670	520	426	328	344	264	280	214	230	175	28,3	20,0
«In	711	552	452	348	365	280	298	227	244	186	30,0	21,0
soSn	754	585	479	369	387	297	315	241	259	197	32,5	22,0
	798	620	507	390	410	314	334	255	274	208	33,7	23,0
f2xe	845	655	537	413	433	332	353	269	290	220	35,6	24,0
63l	892	692	567	436	458	351	375	285	307	233	38,0	25,5
MXe	786	731	598	460	483	370	394	300	323	245	39,7	26,5
fbCs	816	759	621	478	502	385	409	312	335	255	41,3	28,0
sfBa	599	700	654	508	528	405	430	328	353	268	43.8	24,0
"La	214	730	687	529	555	426	452	345	371	282	45,5	31,0
fsCe	226	517	602	556	583	447	475	363	390	296	48,5	32,0
	237	188	447	583	612	469	499	381	409	311	50,7	33,5
eoNd	249	197	469	540	534	492	523	399	429	326	53,0	35,0
«Pm	262	207	172	565	399	516	548	418	450	342	55,4	36,5
e^Sm	275	218	181	399	418L,i,	485	470Z,ii	438	471Z.I	358	57,9	38,0
	289	228	190	417	156	500	358	458	410	374	60,6	39,5

Продолжит табл. 35.6

ill						CoK^,	Ni			CUK„	Mo K^^	
MGd	304	239	200	156	164	353	374	430	429	392	64,5	41,5
вБТЬ	318	351	209	163	172	369	142	450	394	409	67,3	43,0
MDy	333	262	219	170	180	140	149	314	339	385	70,3	44,5
"'Ho	348	274	229	178	188	146	156	328	129	270	73,4	46,5
68Er	364	287	239	186	197	153	163	126	135	281	76,5	48,5
адтт	380	299	250	195	205	160	170	131	141	293	79.7	50,0
70Yb	397	312	261	204	214	167	177	137	147	113	85,1	52,0
"Lu	414	326	272	212	224	174	185	143	154	119	86,5	54,0
« ш	428	335	279	217	228	177	188	145	156	120	84.0	57,0
-xTa	447	350	291	226	238	184	196	151	162	125	88.0	59,0
74W	466	365	304	236	248	192	205	158	170	130	92,1	62,0
	485	380	317	246	259	200	213	164	177	136	96,4	65.0
	506	396	330	256	270	209	222	171	184	141	101	68,0
"1r	527	418	343	267	281	217	231	178	192	147	105	71,0
7ept	548	430	357	278	292	226	241	185	200	153	no	74,0
	570	447	372	289	304	235	251	193	208	159	115	77,0
S	593	464	386	300	316	244	261	201	216	166	120	81,0
	616	483	402	312	328	254	271	208	224	172	125	82,0
82pb	640	501	417	324	341	264	281	216	233	178	130	86,0
3SBi	664	520	433	336	354	274	292	225	242	186	136	89 0
84po	689	540	449	349	368	284	303	233	251	193	141	93!O
86At	715	560	466	362	381	295	314	242	260	200	118	96,8
««Rn	741	581	483	375	395	306	326	251	270	207	124	100
«Er	936	726	602	464	489	375	401	306	330	252	97,8	105
88Ra	982	764	632	487	514	394	421	321	347	264	101	no
8«Ac	1030	802	663	511	539	414	442	337	364	277	104	100
soTh	1080	841	696	536	565	434	463	354	382	291	108	76,0
sipa	1130	881	729	562	593	455	486	371	400	305	115	79,0
92U		923	764	589	621	476	509	388	419	319	124L	81,0
s3Np		967	800	616	650	499	533	407	439	334	57.6	84,0
хфц	—	1010	837	645	681	522	557	426	459	350	(.0,3	87,0

35.7. ВТОРИЧНЫЕ СПЕКТРЫ И ЭФФЕКТЫ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Атомы мишени при бомбардировке рентгеновскими фотонами с энергией /xv>e„ (где ***e„*** — энергия электрона на п-м уровне) могут перейти в возбужденное состояние и образовать вакансию на внутреннем электронном уровне. При этом мишень испускает так называемое ***флуоресцентное*** (характеристическое) излучение, соответствующее переходу электронов на вакантный уровень. Тормозное излучение при этом отсутствует. Максимальную длину волны первичного излучения, вызывающего возбуждение флуоресцентного излучения данной серии, называют граничной (или краем полосы поглощения); ее можно легко рассчитать из выражения Avrp = =/1еДгр=е(п, ***I, jj,*** где ***n, I a j*** — главное, азимутальное и внутреннее квантовое число.

Выход флуоресценции для различных серий дан в табл. 35.7. Здесь приведены в основном средние экспериментальные выходы флуоресценции для атомов однократно ионизованных в /С-оболочке (со/<), ^-оболочке (-OL) и М-оболочке (Юм). а также выходы флуоресценции при переносе дырки /(-оболочки в L-оболочку (**CORL**) и дырки L-оболочки в Л1-оболочку (**WLM**).

Рентгеновскую флуоресцентную спектроскопию широко используют для определения содержания различных элементов в анализируемых материалах на глубину, соответствующую 10*—3'Ю® атомным слоям. Для этих же целей используют электроны, непосредственно вырываемые из атома при прохождении рентгеновского излучения через вещество. Этот метод получил название ***длектронной спектроскопии для химического анализа*** (ЭСХА) и позволяет исследовать 2—10 атомных слоев.

Переход атома в невозбужденное состояние может сопровождаться испусканием не фотона, а электрона. Этот переход называют ***вторичным фотоэффектом*** или ***оже-эффектом,*** а соответствующие электроны — ***оже-электронами.*** Так как энергетический спектр этих электронов определяется разностью энергий разных энергетических состояний атомов, он также является «паспортом» данного сорта атомов, как и характеристическое рентгеновское излучение. Вероятность испускания оже-электронов для атомов с Z<33 даже выше, чем вероятность излучательных переходов.

Спектры вылетающих из образца фото- и оже-электронов чувствительны к электронной структуре, химическим связям, фазовому составу и другим характеристикам кристалла, содержащего эмиттирующий элемент.

Влияние индивидуальных особенностей строения молекул, кристаллов сказывается прежде всего на энергетическом положении Ка -линии. Ширина Кк-линии при переходе от одного соединения к другому меняется незначительно. Однако ширина Ко. -линии может дать полезную информацию о симметрии ближайшего окружения атома в веществе.

Б рентгеновской спектроскопии основные диаграммные линии нередко сопровождаются сателлитиьши линиями — слабыми линиями как с коротковолновой сто-

роны (коротковолновые сателлиты), так и с длинноволновой (длинноволновые сателлиты). Сателлиты сильно чувствительны к строению индивидуальных веществ, причем нередко их чувствительность к факторам электронного или геометрического строения превосходит чувствительность основных диаграммных линий. Значительное число сателлитов появляется в результате электронных переходов в многократно ионизованных атомах. В результате таких переходов появляются, как правило, коротковолновые сатемиты; например, группа сателлитов /С» -линии (а',, «2, ttg и а,) возникает при переходах между состояниями в двукратно ионизованных атомах ***KL—V,*** при этом сама группа из пяти линий возникает благодаря наличию LS-взаимодействия.

Часть сателлитов находится далеко от основной линии и не оказывает влияния на ее форму, однако некоторые сателлиты могут существенно повлиять на форму К(11.2-линий, особенно в полосе ее «хвостов».

Кроме коротковолновых в Як-линии могут наблюдаться и длинноволновые сателлиты, так как в процессе испускания сателлитной линии часть ее энергии может быть унесена оже-электронами. Эти сателлиты, как правило, мало сказываются на форме основной линии.

Химические сдвиги сателлитов, так же как и основных Ai -линий, могут быть использованы для идентификации зарядового состояния исследуемого атома (табл. 35.8).

Таблица 35.7. Выход флуоресценции на один акт фотоэффекта, % [3]

Элемент	"К	Элемент		Элемент	"к	Элемент	
«Be	0,0304		28,30	"Ru	79,3	e«Gd	93,4
«B	0,056		31,30		80,7	60Tb	93,7
«C	0,26	26Fe	34,20	46pd	81,9	««Dy	94,3
'N	0,60	"Co	36,60	"Ag	83,4	6'Ho	94,3
Ю	0,94	28Ni	41,40	«Cd	84,0	68Er	94,5
«F	1,13		44,30	«In	85,0	6fTm	94,8
WNe	1.82	sozn	47,90	50Sn	85,9	70yb	95,0
iiNa	2,60	3iGa	52,80	"Sb	86,7	"Lu	95,2
	3,36	32Ge	55,40	52Te	85,7	«Hf	95,4
	3,80	33As	58,80	531	88,2	"Ta	95,6
"Si	4,30	MSe	59,60		89 4		95,7
Тф	6,00	s^Br	62,20		88^9	'SRe	95,9
«s	8,20	з6кг	66,0	56Ba	90,1	'Юз	96,1
I'Cl	9.55	"Rb	66,9		90,6	"Ir	96,2
WAr	12,20	sesr	70,2		91,1	78pt	96,7
ISK	11,50	3.Y	71,1	\^sCe	91,5	'«Au	96,4
		«Zr	73,0	59pr	92,0	80Hg	95,8
	19,00	«Nb	74,8	«"Nd	92,4	82pb	97,2
22Ti	22, iO		76,4	wpm	92,8	92y	97,0
23V	25.30	"Tc	77,9	e^Sm	92,5	—	
				"3Eu			

Продолокение табл. 34.3

Элемент	"KL		Элемент	""kl	"L	Эле-		
23V		**0,235**	**s^Cs**		**8,90**	**MTa**	**28,0**	**22,5**
		0,295	**«"Ba**	**14,8**	**9,3**	**74^**	**31,0**	**29,8**
		0,56	**"La**	**12,3**	**11,0**	**'6Re**	**30,0**	
3iGa	–	**0.64**	**58Ce**	**16,0**	**16,3**	**'«Os**	**32,0**	**34.8**
36Kr	–	**7,50**	5spr	**12,3**	**16,7**	***Шт***	**31,0**	**30,0**
="Rb	**1,30**	**1,10**	**e«Nd**	**16,0**	**17.0**	7ept	**36,0**	**32,0**
зау		**5,70**	**eiPm**	**18,5**		**'«Au**		**43,0**
40Zr	**3,40**		**62Sm**	**17,0**	**18,8**	soHg	**41^0**	**40,0**
"Nb	**2,20**		**esEu**	**17,0**	**17,0**	**"T1**	**44,0**	**41,0**
^*mo*		**6,70**	**""Gd**	**18,0**	**19,8**	82pb	**39,5**	**29.7**
«Pd	**4,70**		65Tb	**19,5**	**19,4**	8SBi	**41,4**	**33,0**
	4,40	**6,59**		**21,0**		**MRa**		**40,0**
	5,50		**«'Ho**	**17,0**	–	**9«Th**		**48,8**
Щп	**6,5**	—	***^Er***	**21,0**	—	9ipa	—	**50,0**
8"Sn	**6,4**		**«»Tm**	**23,0**			**40,9**	**53,0**
«Sb	**7,0**	**11,9**	**70Yb**	**25,0**	–	9SNp		**49,0**
"Te	**7,3**	**12,2**	**"Lu**	**26,0**	**29,0**	9фи	–	**56,6**
	9,1	–	**«Hf**	**29,0**	**29,0 1**	**sbcm**	–	**53,1**

Элемент	***"lm***	***""M***	j Эле-	1
			M- серия	
'«Os	1,3		ssBi 3,0	3,5
""Au	2,4	2.3	eaU	6,0
82pb	2,6	2,9		

Таблица 35.8. Сдвиги Cr , 3 - и SriLg, - линий [4]

	CrPз	-+-0,66		SnCl	+0,176
	CrCI3	+0,56		SnC	+0,144
	CrBrз	-+-0,46		Sn**HGO4**	f0,098
	Cf2O3	+0.40		SnS	+0,063
	CdCr2Se4	+0,77		SnCU	—0,085
	CuCr2S4	+0,63		PbSnOa	-0.0179
	COCГ284	+0,71		SnO^	-0,180
	CrCr,S4	+0,64		CaSn0Si04	—0,198
	ClO2	+0,12			
Crs+	Cr,0,	—0,39			
		-0,84			
	Flf(C"r(	-0,74			
		—0,91			
		-0,84			
	CUaCr^	—0,79			
	X				
	CaCr	—0,64			
	BaCr04	**-0,86**			
	CrO3	-0,83			

Примечание. Положения CrK^ ственно в чистом Cr и Sn приняты за О эВ.'

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

£Т.блиы ф ™ с „ „ .™™я: ред. академика И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

С„р..оч™к/Под струк,ур«о11 химии, 1983. Г 24, » 2. С. 128-155.

3. Блохин М. А., Швейцер И. Г. Рентгеноспектральиыи справочник. М.: Наука, 1982.

Глава 36
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Ю. п. Никитин

36Л. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

К разряду ***элементарных частиц*** следовало бы относить наиболее простые, неделимые частицы материи. Исследования строения атомов и атомных ядер показали, что эти микрообъекты являются составными. Электроны, находящиеся на периферии атома, протоны и нейтроны, образующие атомные ядра, стали называть элементарными частицами, подчеркивая тем самым, что они более простые частицы, чем атомы и ядра атомов. К элементарным частицам причислили фотоны — кванты электромагнитного поля, а также нейтрино, появляющиеся в процессах Р-распада ядер. Дальнейшие исследования показали, что в процессах взаимодействия элементарных частиц образуются и другие типы частиц, большинство из которых взаимодействуют с протонами и нейтронами и между собой с такой же интенсивностью, как протоны и нейтроны в ядрах атомов. Эту большую группу частиц также назвали элементарными. Однако оказалось, что большинство частиц, отнесенных к разряду элементарных, нестабильны и могут в результате распада превращаться в другие элементарные частицы. При этом нельзя считать, что продукты распада более элементарны, чем сами распадающиеся частицы, поскольку, как правило, наблюдается несколько различных каналов распада одной и той же частицы. Поэтому нельзя заключить, что нестабильные частицы состоят из частиц — продуктов распада. Обнаружены были также частицы, напоминающие по своим свойствам электроны, но являющиеся нестабильными и существенно более массивными, чем электрон. Установлено существование трех разновидностей нейтрино.

Таким образом, к разряду элементарных частиц в настоящее время принято относить все микрочастицы, за исключением ядер атомов с массовым числом больше единицы fl]- Имеются серьезные основания считать, что большинство «элементарных» частиц обладает внутренней структурой, ио в то же время у таких частиц, как, например, электрон, нейтрино, внутренняя структура не обнаружена при исследовании до расстояний порядка 10-'б см [2, 3].

36.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В исследованной области энергий, которая соответствует пространственному разрешению порядка Ю-"®— 10-1" см, различают четыре основных вида взаимодействий частип: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное [1, 2]. В гравитационных взаимодействиях участвуют все элементарные частицы, но гравитационные силы очень слабы, так как малы массы элементарных частиц. Например, гравитационное взаимодействие двух протонов в 10-'® раз слабее их электростатического кулоновского взаимодействия. Все электрически заряженные частицы и некоторые нейтральные участвуют в электромагнитных взаимодействиях. Самую большую группу образуют частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. В частности, сильные взаимодействия обусловлены ядерными силами, действующими между протонами и нейтронами на расстояниях, меньших 10-'^ см, обеспечивающими стабильность атомных ядер.

Сильновзаимодействующие частицы называют ***адронами.*** Известно несколько сот их разновидностей. Адроны участвуют во всех видах взаимодействий. Среди них различают ***мезоны,*** частицы с целочисленным значением спинового квантового числа, и ***барионы,*** частицы с полуцелым спином. Все адроны, за исключением, может быть, протона, нестабильны относительно сильного, электромагнитного или слабого взаимодействия. Адроны, нестабильные относительно сильного взаимодействия, принято называть ***резонансами.***

Частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, образуют два небольших семейства. Одно из них представляют ***лептоны*** — электрон, мюон, т-лептон, а также электронное, мюонное и т-нейтрино. Другое семейство до последнего времени представлял фотон — безмассовая частица со спином, равным единице, являющаяся переносчиком электромагнитного взаимодействия, квантом электромагнитного поля. В 1983 г. были открыты массивные заряженные (W^) и нейтральный ***(Z°)*** бозоны — частицы со спином, равным единице, являющиеся переносчиками слабого взаимодействия Фотон, и Л°-бозоны относят к семейству ***векторных калибровочных бозонов.***

Слабое взаимодействие ответственно за распады адронов и лептонов, стабильных относительно сильного и электромагнитного взаимодействий. Эффективный радиус слабого взаимодействия не превышает 10""= см. Поэтому на больших расстояниях оно существенно слабее электромагнитного, которое, в свою очередь, до расстояний порядка 10-'® см слабее сильного взаимодействия. На расстояниях, меньших см, слабые и электромагнитные взаимодействия, как выяснилось в последнее время, образуют ***единое электрослабое взаимодействие.*** Возможно, что не только слабое и электромагнитное взаимодействия имеют единую природу, но и остальные виды взаимодействия представляют собой проявление некоторого единого фундаментального взаимодействия. Свидетельством единой природы слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий могло бы быть экспериментальное доказательство нестабильности протона.

Большинство адроиов и все известные лептоны имеют партнеров с такими же массой и временем жизни, но противоположных по ряду других характеристик, Этв партнеры называются ***античастицами.***

36.3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ И ВНУТРЕННИЕ СИММЕТРИИ

Во всех взаимодействиях элементарных частиц, включая соударения и распады, выполняются законы сохранения энергии, импульса и момента количества движения (в квантовомеханической трактовке). Эти законы, как известно, являются следствием однородности пространства-времени Минковского и изотропности трехмерного пространства, в котором осуществляются процессы взаимодействия. Кроме указанных законов сохранения, связанных с симметрией пространства-времени, в процессах взаимодействия элементарных частиц с той или иной степенью строгости выполняется еще ряд законов сохранения, обусловленных внутренними квантовыми числами частиц {иначе, внутренними симметриями), которые были установлены экспериментально [1].

Строгие законы сохранения квантовых чисел элементарных частиц имеют место во всех видах взаимодействия. К таким законам, нарушение которых пока не обнаружено, относятся: ***сохранение электрического заряда*** — суммарный электрический заряд частиц в начале процесса взаимодействия и суммарный электрический заряд частиц, образующихся в результате взаимодействия, совпадают (электрический заряд элементарной частицы по абсолютному значению кратен заряду электрона ***е)\ сохранение барионного заряда*** — во всех процессах взаимодействия изменение числа барионов должно сопровождаться точно таким же изменением числа антибарнонов. Барионам приписывается барионный заряд В=1, антибарионам В=—1. Барионный заряд остальных частиц В=0; ***электронный, мюонный*** и ***т-лептонный заряды*** приписываются соответственно электрону и электронному нейтрино V£(/c=1), мюону и мюонному нейтрино vji (lii, = 1), т-лептону и х-нейтрино \z (ix = 1). Антилептонам приписываются противоположные по знаку лептонные заряды. Для остальных известных частиц 1е=1\1 —и =0. Экспериментальные данные свидетельствуют о сохранении лептонных зарядов всех трех разновидностей в отдельности. Имеются теоретические основания полагать, что законы сохранения барионного и лептонных зарядов не являются строгими [3].

Нестрогие законы сохранения квантовых чисел элементарных частиц имеют место в одних типах взаимодействий и нарушаются в других. К таким квантовым числам относят: изотопический спин, гиперзаряд, пространственную и зарядовую четности, С?-четность и ряд других.

Изотопический спин I представляет собой внутреннюю характеристику адрона, отражающую инвариантность сильных взаимодействий относительно вращений в воображаемом трехмерном изоспиновом пространстве. Квантовое число / определяет значение квадрата вектора изотопического спина, I (P=1 (/-1-1), приписываемого мультиплету адронов с одинаковыми свойствами по отношению к сильным взаимодействиям и с примерно одинаковыми массами и другими характеристиками, кроме электрических зарядов. Число адронов в изотопическом мультиплете составляет 2/-Ь1. В процессах сильного взаимодействия сохраняется квантовое число / полного изотопического спина частиц, участвующих в реакции, и квантовое число третьей проекции полного изотопического спина /з, которое определяется как алгебраическая сумма проекций изотопического спина взаимодействующих адронов. В электромагнитных взаимодействиях адронов полный изотопический спин не сохраняется, но сохраняется его проекция. В слабых взаимодействиях нарушаются законы сохранения как так и /з.

Странность S как внутреннее квантовое число приписывается некоторым мезонам (каонам) и барионам, которые принято называть ***гиперонами.*** Закон сохранения странности как аддитивного квантового числа установлен эмпирически в процессах сильного и электромагнитного взаимодействий. Слабые взаимодействия нарушают этот закон. Сохранение странности приводит к стабильности (относительно сильных взаимодействий) каонов и наименее массивных гиперонов, которые распадаются в результате слабого или электромагнитного (2"-гиперон) взаимодействия.

Очарование с, прелесть b — новые типы аддитивных квантовых чисел, приписываемых наиболее тяжелым из открытых недавно адронов. Подобно странности эти квантовые числа сохраняются в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняются в слабых взаимодействиях.

Гиперзаряд Y есть сумма квантовых чисел: ***Y=B+*** -fS-fc-l-b, он связан с электрическим зарядом Q (в единицах | е|) и проекцией изотопического спина /следующим соотношением: С = /з-ЬУ/2.

Пространственная четность P элементарной частицы определяется характером преобразования ее волновой функции при зеркальном отражении пространственных координат в системе отсчета, где свободная частица покоится. Если частица обладает определенной четностью, то ***P=±1.***

Зарядовая четность C является внутренним квантовым числом так называемых истинно нейтральных частиц, у которых античастицы и частицы совпадают, а также нейтральных составных систем, которые при зарядовом сопряжении (замене частиц античастицами) переходят сами в себя. В слабых взаимодействиях нарушаются законы сохранения ***P-*** и С-четности, но в большинстве случаев сохраняется комбинированная СР-четность. В распадах нейтральных каонов нарушается и СР-четность.

G-четность определяется как собственное значение оператора С=С exp ***(inh),*** где /г — вторая проекция изотопического спина, G-четность представляет собой внутреннее квантовое число адронов или систем адронов с нулевой странностью (очарованием, прелестью) и нулевым барионным зарядом. G-четность сохраняется только в сильных взаимодействиях.

36.4. КВАРКОВАЯ СТРУКТУРА АДРОНОВ

Все обнаруженные виды адронов могут быть «сконструированы» из небольшого числа гипотетических фундаментальных частиц, получивших название ***кварки*** [2, 3]. Минимальное число сортов (ароматов) кварков, которое необходимо для этого, равно пяти. Кваркам приписываются такие квантовые числа, как спин, изотопический спин, странность, очарование, прелесть, электрический и барионный заряды. Выбор спинового квантового числа кварка, равного 5=1/2, обеспечивает возможность конструирования адронных состояний с любым целочисленным или полуцелым значением спина. Два кварка из пяти, ***и и d,*** образуют изотопический дублет, т. е. им приписывается изотопический спин /=1/2 и его проекция 1з=±112, что позволяет сконструировать любой изотопический мультиплет адронов. Кварки s-, с- и 6-типов являются изосинглетами (/=0) и характеризуются соответственно квантовыми числами странностью ***S,*** очарованием с и прелестью ***Ь.***

Существуют веские теоретические аргументы в пользу существования шестого сорта кварков ***t*** со специфи-ческим внутренним квантовым числом ***t.*** Одновременно предполагается существование соответствующих антикварков. Квантовые числа кварков представлены в табл. 36.1. Мезоны можно составить из кварка и антикварка, барионы — из трех кварков, антибарноны — из трех антикварков. Выбирая различные спиновые состояния кварков и их относительные орбитальные моменты.

можно построить наблюдаемые адронные состояния с любыми значениями спина и четности. Поскольку кварки с разными квантовыми числами равноправны, каждому из них приписывается дробный барионный заряд 6=1/3 (у антикварков В= —1/3). Тогда по формуле (3=/з+К/2, где К=е+S-fc+6H-f, вычисляется заряд кварка Q, который также оказывается дробным (по отношению к абсолютному значению заряда электрона). Квантовые числа антикварков противоположны по знаку квантовым числам кварков, указанным в табл. 36.1 (кроме /).

В табл. 36.2, 36.3 приводится кварковый состав наиболее распространенных мезонов и барионов, содержащих кварки трех сортов: *u, d, s*. Символом обозначены спин и четность адрона (полный момент и четность системы кварков, образующих адрон); ***I, h*** — изотопические квантовые числа адронов; У — их гиперзаряд. Адроны, указанные в табл. 36.2, 36.3, образуют мультиплеты, состоящие из восьми или десяти частиц, массы которых отличаются от средней массы частиц мультиплета на 10—15%. Исключение составляют аномально легкие пионы (я;±, л°). Наблюдаемое объединение близких по массам адронов в более сложные по сравнению с изотопическими мультиплеты свидетельствует о том, что в мире адронов осуществляется, хотя и приближенно, более высокая симметрия, чем изотопическая. Она получила название *унитарной симметрии.*

Унитарные мультиплеты (табл. 36.2) представляют собой состояния, преобразующиеся по неприводимым представлениям группы ***SU*** (3) [2, 3] Базисным представлением этой группы являются трехкомпонентные спиноры. Кварки *u, d, s* как раз и отвечают состояниям, образующим базисное представление группы ***SU*** (3). Включение в рассмотрение *c-, b-* и *t-* кварков приводит к расширению группы симметрии до ***SU*** (4), ***SU*** (5) и ***SU*** (6) соответственно. Экспериментальные данные о массах адронов, содержащих с-кварки, указывают на то, что симметрия ***SU*** (4) нарушена в мире адронов уже гораздо сильнее, чем ***SU*** (3). ***SU*** (4) и более высокие симметрии проявляются в существовании адроиных мультиплетов, образующих частицы, сильно различающиеся по массам. Реализация в природе лишь таких адронных состояний, которые предсказываются кварковой моделью, — серьезный аргумент в пользу существования кварков как реальных физических объектов, а не математических символов, отражающих приближенную, сильно нарушенную симметрию в мире адронов. До настоящего времени сколько-нибудь убедительных прямых экспериментальных доказательств существования кварков в свободном состоянии нет. Однако кроме успешной классификации адронов по мультиплетам получены косвенные свидетельства существования внутри адронов кварков с предсказываемыми квантовыми числами. Перечислим лишь некоторые эксперименты такого рода. Это эксперименты по спектроскопии семейств //i])- к Г-мезонов, по глубоконеупругому взаимодействию заряженных лептонов и нейтрино с нуклонами, процессы с+е--аннигиляции в адроны и другие исследования, которые успешно интерпретируются в рамках гипотезы с существовании внутри адрона кварков как его составных частей с эффективным размером, существенно меньшим размеров адронов. Сильное нарушение в адронном мире ***SU*** (4)-и более высоких симметрий связывается с заметным утяжелением кварков *c, b к t по* сравнению с *u. d, S* [2, 3].

Таблиц 5.1 Квантовые числа кварков

сорт кварка	Q	в	/	/з	S		ь	t	V
u	**2/3**	**1/3**	**1/2**	**1/2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**- 1 / 3**
d	**— 1/3**	**1/3**	**1/2**	**- 1 / 2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1/3**
S	**—1/3**	**1/3**	**0**	**0**		**0**	**0**	**0**	**- 2 / 3**
c	**2/3**	**1/3**	**0**	**0**	**0**		**0**	**0**	**4/3**
b	**- 1 / 3**	**1/3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**—1**	**0**	**- 2 / 3**
	2/3	**1/3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**4/3**

Таблица 36.2. Кварковый состав адронных октетов

Y	/	*h*	Барионы	Кварковый состав	Мезоны	j Кварковый состав	Мезоны	Кварковый состав
1	**1/2**	**1/2**	*p*	*uud*		*US*		**пЫ**
1	**1/2**	**- 1 / 2**	*n*	*ddu*	*K"*	*dl*	*K°o*	*ds*
0	**1**	**1**	**S+**	*uus*		*Ud*		*lid*
0	**1**	0	**so**	*uds*	**.0**	*(ЫЫ — dd)* $V\ 2$	**рО**	*(u ü - d d)* $r\ r$
0	I	**—1**	**S -**	*dds*	**Я-**	*du*	**р"**	*du*
0	0	0	**A**	*uds*		*uu, dd,* ss		*(uм -f d d), ss* $Y\ 2$
—1	**1/2**	**1/2**	**SO**	*uss*		*I s*		**ds**
—1	**1/2**	**—1/2**	**S -**	*dss*	*K-*	*lis*	iC*-	*hs*

Пр; **унитарного скаляра** унитарного октета

Таблица 36.3. Кварковый состав барионного декуплета

Барионы	*Y*	/	/з	Кварковый состав
Д++	*1*	3/2	3/2	*uuu*
д+	1	3/2	1/2	*uud*
Д"	1	3/2	- 1 / 2	*add*
д -	1	3/2	- 3 / 2	*ddd*
SM	**0**	1	1	*uus*
S*"	**0**	**1**	**—1**	*dds*
Е«	– 1	1/2	1/2	*uss*
Е*-	– 1	1/2	- 1 / 2	*dss*
Q-	**—2**	**0**	**0**	sss

36.5. ЭЛЕКТРОСЛАБОЕ И СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Открытие в 1983 г. векторных W^- и го-бозонов в предсказанной теорией области масс: ***m*** (И7±)гш80 ГэВ, m CZ")» 90 ГэВ укрепило доверие к теоретическим калибровочным схемам, объединяющим различные типы Езаимодействий в единое взаимодействие. Теория электромагнитных взаимодействий с сохраняющимся электрическим зарядом может быть построена на основе локальной калибровочной симметрии U (1). Это группа унитарных преобразований с одним параметром, зависящим от координат точки пространства Минковского, где осуществляется преобразование. Она является абелевой — различные V (^-преобразования коммутируют между собой. Рассмотрение неабелевых групп калибровочных преобразований, в частности локальной калибровочной симметрии ***SV (2)@JJ*** (1), требующей введения четырех калибровочных безмассовых векторных полей, позволило построить единую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий. При этом первоначально безмассовые векторные калибровочные бозоны приобрели, за исключением фотона, массы за счет взаимодействия со скалярным полем, спонтанно нарушающим ***SU*** (2)ф6‘ (1)-симметрию вакуумного состояния (механизм Хиггса) до электромагнитной калибровочной симметрии и,т (1).

В основу калибровочной теории сильных взаимодействий [4] положена калибровочная симметрия ***SU*** (3)с. Использование этой группы симметрии связано прежде всего с необходимостью обеспечить выполнение требований статистики Ферми — Дирака для грехквварковых систем, образующих, например, Д++- или о--барионы в состояниях с проекцией спина /з»3/2, при нулевых значениях кварковых относительных орбитальных моментов, характерных для основных состояний связанных систем. Простейший способ обеспечить антисимметрию указанных состояний барионов относительно перестановки любой пары кварков — приписать каждому кварку с заданным ароматом ***(ароматом*** часто называют сорт кварка — ***u, d, s, c и*** т. д.) еще одно квантовое число, которое может принимать три различных значения. Это квантовое число получило название ***цвет.*** Антисимметризация волновых функций кварков по цветовым степеням свободы обеспечивает требования статистики Ферми — Дирака для барионных состояний со спиином и четностью 3/2+.

Указанные три цветовых состояния образуют спинорный базис группы ***SU*** (3)с. Предположение о строгой инвариантности сильных взаимодействий относительно цветовой калибровочной группы преобразований ***SU*** (3)с приводит к практически однозначному построению теории сильных взаимодействий кварков, которые осуществляются за счет обмена безмассовыми векторными частицами — ***глюонами,*** обладающими восемью цветовыми степенями свободы. В таком подходе фигурирует единственный параметр теории — безразмерная константа сильного взаимодействия а » с , где ***g*** — аналог электрического заряда, называемый ***цветовым зарядом.***

Как и квантовая электродинамика (КЭД), теория взаимодействия цветных кварков и глюонов — квантовая хромодинамика (КХД) — оказывается перенормируемой, что считается несомненным теоретическим достоинством. В отличие от фотона, который электронейтрален, глюоны обладают цветовыми зарядами и взаимодействуют друг с другом даже в отсутствие кварков. Это обстоятельство приводит к специфическому поведению перенормированной константы сильного взаимодействия а^(г) в зависимости от расстояния между взаимодействующими кварками. По существу величину as(r) уже нельзя называть константой. Для нее придумано специальное название — бегущая константа сильного взаимодействия. В то время как в КЭД аналогичная величина а(г) логарифмически растет при г—>-0, в КХД из-за указанного эффекта взаимодействия глюонов между собой при г-—>-0 бегущая константа сильного взаимодействия ведет себя как as(r)'^[In (го/г)]-'—'О (/о — размер адрона). Этот эффект получил наименование ***асимптотической свободы*** сильных взаимодействий. Его существование позволяет проводить расчеты процессов сильного взаимодействич на малых расстояьиях (при больших передаваемых импульсах) по теории возмущений. Более того, экстраполяция поведения as{r) на большие расстояния г между взаимодействующими цветными кварками указывает на возможность запирания кварков в адроне.

Этот эффект пока не доказан теоретически, так как при as(r)^1 нельзя пользоваться теорией возмущений к необходимо развить методы расчета, применимые при больших значениях эффективной константы взаимодействия:^м не менее обнаруженные экспериментально адроны являются бесцветными. Они — скаляры группы ***SU*** (3)е. Гипотеза запирания цветных кварков внутри адронов позволяет понять, почему наблюдаются только бесцветные адроны и почему кварки не существуют в свободном состоянии. Наконец, следует отметить, что вплоть до расстояний порядка Ю-'® см не обнаружено никакой структуры у электронов и мюонов [3]. Это дает основания рассматривать лептоны, наряду с кварками и калибровочными бозонами, как фундаментальные микрочастицы материи, которые определяют свойства и взаимодействия элементарных частиц, по крайней мере, на расстояниях, больших Ю"'® см.

36.6. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, СТАБИЛЬНЫЕ ПО ОТНОШЕНИЮ К РАСПАДАМ ПО СИЛЬНОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ

Погрешности измерений, приведенные в табл. 36.4, представляют собой в большинстве случаев средние квадратические отклонения. Если приводятся результаты обработки различных экспериментальных данных и погрешности измерений распределены при этом не по нормальному закону, то истинная погрешность находится умножением вычисленной погрешности на множитель S, приводимый в табл. 36.4. В таблице ***C„*** — зарядовая четность нейтральной частицы; Г — полная и1ирина распада в энергетических единицах: ***p*** — наибольшее из возможных значений импуАса одной из частиц — продукта распада в системе покоя распадающейся частицы; с — скорость света; ***h*** — адрон; nj^i. — право- или левополяризовавший фотон. Символ ***a*** | (а-^—***>-CC)*** означа-

Таблица 36.4. Характеристики элементарных частиц, стабильных по отношению к распадам по сильному взаимодействию [5]

Частица		Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	
			Калибровотые бозоны			
	0.1 (1-)-	<3-10-33	Стабилен	–	–	–
	У = 1	80 800 (2700)	Г < 7 ГэВ	*еч*	Обнаружен	40 400
Z	/ = 1	92 900 (1600)	Г < 8,5 ГэВ	*е*е-*	\ Обнаружен *I*	46 450 46 450
			Лептоны			
v^	1/2	<4,6-10-§	Стабильно, МэВ	—	–	—
е	1/2	0,5110034 (14)	Стабилен, *т* > 2 • 10^^ лет	—		—
•'и	*J=* 1/2	0 (< 0,50)	Стабильно, i:>1.1.10®m^ МэВ	-	—	—
	J = 1/2	105,65932 (29)	2,19709(5) • 10-е	fxj (fX+ -V CC)		
					0,986(4)	53
					0,014(4)	53
					<0,05	53
				О	<1,7 • 10-W	53
				е-е^е-	< 1 ,9 . 10-"	53
				е-jx	<8,4 . 10-S	53
				е~ччe'^e-	2,2 (1,5) • 10-S	53
	J = 1/2	< 164	–	–	—	—
	J= 1/2	1784,2(3,2)	3,4(0,5) • 10-и	•Z- CO		
					0,185(11)	889
				ечч	0,165 (9)	892
				h- -i- нейтральные частицы	0,481 (20)	–
				3й* + нейтральные частицы	0.170(13)	–
				5/г~ + нейтральные частицы	**<0.014**	–
				3ft±v	0,05(4)	–
				*Ьк^* V (> 1f)	0,12(4)	–
					0,103(12)	887
				р-V	0,221 (24)	726
				к--	0,013(5)	824
				к- + нейтральные частицы	Мала	–
				К-* (892)v	0,017(7)	669
				К-* (1430) V	<0,009	323
				р'Ч	0,054(17)	718
				е + {х- + заряжецмыс частицы	<0,04	–

Частоца	Квантовые числа	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	МэВ/с
				e-y	<5,5-10-*	889
					<6,4.10-«	892
					<4,9-10-*	876
					<3,3-10-*	886
				V-e-e-	<4,4-10-*	889
				*e-e*e-*	<4,0-10-*	892
				fXJO®	<8,2-10-*	884
				e-Tfi	<2,1-10-®	887
				1X-/C»	<1,0-10-3	819
				ez-K'>	<1,3-10-®	823
				fX-pO	<4,4-10-*	722
				e-po	<3,7-10-*	726
			Нестранные мезоны			
	1- (0-)	139,5673(7)	2,6030(23) • 10-8			
					~ 1	30
					1,232 (24)-10-*	70
		= 33,9080 (8)			1,24 (25)-10-*	30
					5,6 (7)-10-8	70
				e+vito	1,033 (34). 10-8	5
				e+ve+e-	<5-10-8	70
					<1,5-10-®	30
					<8-10-3	30
„0	1- (0-)-^	134,9630 (38)	0 ,83 (6) • 10""	TT	0,98802 (20)	67
			S = 1,8	Te+e-	0,0198	67
		="4,6043 (37)		m	<3,8-10-'	67
				e+e-e+e-	3,24-10-5	67
				Ш Т	<4-10-"	67
				e+c-	(1.8±0,7)-10-'	67
				MM	<2.4-10-^	67
				fx+e- + fx-e^	<7-10-8	26
1	0- (0-)+	548,8(6)	Г = 0,88(12) кэВ	TT	0,390 (8)	274
		S = 1,4	Нейтральные распады	ЗиО	0,318(8), S=1,1	180
			(70,9 + 0,7) %		0,10 (2)	258
			Заряженные распады	Tt+Jt K®	0,237 (5)	175
			(29,1+0,7) %	it+Tt-Y	0,0491 (13)	236
				e^e-y	0,0050 (12)	274
				(X+fX-y	3,1(4)- 10-*	253
				e+e-	< 3 - 10-*	274
				fx+fx-	6,5 (2,1)-10-"	253
				TE+jt-e+e-	0,0013(13)	236
				71+H-Y1	<0,0021	236
					<0,0006	175
					<0,0015	236
					< 5 - 10-5	258
				TtVI^"	<5 -10-"	211
					< 3 - 10-e	211
			Странные мезоны			
	1/2 (0-)	493,667(15)	1,2371 (26) • 10-3	(K- CO		
		mc± - =	S = 1,9	[%D	0 ,6351 (16)	236
		= — 4,01 (13)		*T.+n"*	0,2117 (15)	205
		5 = 1 . 1		K+IC+5C-	0,0559(3), S=1,1	125
				TiFHOjO	0,0173(5), S=1,4	133
					0,0318(10), S = 1,9	215
				7t0e+v	0,0482(5)» S=1,1	228

Продолжение табл. 34.3

Частица	Квантовые числа !	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	p, МэВ/с
				fX+VY	(5,8±3,5) • 10-3	236
				-.Or-Ofi+V		207
				-/Г-.-е*^	(3,90±0,15)-10-=	203
					< 1,2.10-8	203
					(1,4±0,9).10-"	151
					< 3,o-io-«	151
				e+v	(1,54±0 ,07).10-=i	247
					n.52±0,23)-10-'i	247
					< l,6.10-«	247
					(2,75±0,16)-10-''	205
					(l,0±0,4).10-«	125
					<6-10--	215
					(3,7 ± 1,4). 10-^	228
					(2,7±0,5)-10-'	227
				*m-e-^e**	< i.io-«	227
					<2,4.10-"	172
					<8-10-"	227
				^^TTT	<1,0-10»	227
					<1,4.10-'	227
					< 7- 1O-s	214
				*•:*e-a**	<5.10-3	214
				e+v-v-v	<6.10-!^	247
				(x+vvT	<6.io-«	236
				(x+ve+e-	(11±3)-10-'	236
				(x-ve+e+	<2,0-10-8	236
				e+ve+e-		247
					<4-10-3	236
				(X+V^	<3,3-10-3	236
					<3-10-3	228
	1/2 (0-)	497,67 (13) S = 1,1	—	50% Ks 50%	—	-
	1/2 (0-)	—	0,8923 (22). 10-10	Tt+TC-	0,6861 (24), S = 1,1	206
				тсОтс-	0,3139	209
					(1,85±0,10)-10-3	206
				(xV"	<3,2.10-"	225
				e^e-	<3,4-10-^	249
				TT	<4-10-»	249
					<8,5-10-=^	133
				jiOjcOjiO	<3,7.10-5	139

табл. 36.4

Частица	Квантовые числа	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	МэВ/с
К	1/2 (0-)	= = 3,521 (14) X X 10-12 МэВ	5,183 (40) • 10-8	цОлОтс-	^21,5±^1,0) %	139
				Th+Th®	(12,39±0,20) %, S = 1,3	133
					(27,lrb0,4) %, S = 1,4	216
					(38,7±0,5) %, S = 1, 5	229
				nevTT	(1,3 d= 0,8) %	229
				TE=IC-	**(0,203±0,005) %, S = l , l**	206
					(0,094+0,018) %, S = 1,5	209
					(4,41±0,32).10-=	206
					<2,4-10-^	231
					(4,9±0,4)-10-^	249
				eli	**<6.io-«**	238
					(9,1±1,9)-10-»	225
					(2,8=fc2,8).10-'	225
					<1,2-10-''	177
					<2,0-10-'	249
				e+e-r	(1,7d=0,9)-10-5	249
				TiO)g+e-	<2,3-10-"	231
				Ti+n-e+e-	<9-10-6	206
					(6,2±2,0)-10-5	207
				(7i[x aTOM)-v	(1,05±0,11).10-'	–
			Очарованные нестранные мезоны			
	1/2 (0-)	Шд+ — Шко = = 4,7 ±0,3	9 , 2 + 5 . 10-W	**(D- *CC)***		
				e± + всё	п 1о+0,04	–
				K-Ч-всё	0,16(4)	–
					0,48(15)	–
				K* + всё	0,060(33)	–
				11+всё	<0,13	–
					0,046(11)	845
				A-Л+ттО		816
					5 = 1,3	
				/(•-It+JC+It+JC-	<0,04	772
					0,018 (5)	862
				K^rJmO	0,13 (8)	845
					0,084 (35)	814
					0,0045 (30)	792
					<0,006	744
					<0,0023	845
				тс+я"	<0,005	925
				я+к+л-	<0,004	908
					< 0,037	714
				(X+V	<0,02	932
	1/2(0-)	.7(6)	***^t'oi)*** 10-«	DO (5" - CC) + всё		

Продолжение табл. 34.3

Квантовые числа			Среднее время жнзнн.	Продукты распада	Относительная вероятность	
				К- + всё	% ,	-
				Я" + /С" + всё	(33 ±'1О) %	–
				/С+ + всё	(8 ± 3)	–
				7)4-всё	< 13%	—
			Г (Д О ^ Д " ^ К-^ж-) <0,16		(2.4 ± 0,4) %	861
				K-It+Tl®	(9,3 ±2,8) %	844
				/C-71+Jt+Jt-	(4,6 ±1.4) %, S = 1,2	812
				/C-TT+TTO^O	Обнаружен	815
				К^к»	(2,2 ± 1,1) %	860
					(4,2 ±0,8) %	842
				71+71-	(7,9 ± 3,8)-10-^	922
					< 1,0 %	768
				К*К-	(2,7 ±0,8). 10-3	791
					(3.4 ± 1,4) %	711
					(.,4 %	711
				К-f*	(7,2 ± 1 ; °) %	679
				к у	(О., ±»;S) Я	677
				Ж'*у	(0.7 ±»;») г.	423
				Л-т^+рО		613
					< 2 , 3 %	685
				Я - Л +	0,8%	198
			Очарованный странный мезон			
	О(О-)	**1971 (6)**	- о . г j 10-18	***f + (F- CC)***		
					Обнаружен	
				7Jt+7t+JC-Tj'E+Jt+Jt-p+Y	Возможно, обнаружен	
			прелестные мезоны			
	1/2 (0-)	**5270,8 ± 3 , 0**		***В^ (В- ^ CC)***	(4,2 ±4,2) %	2303
					(4,8 ±3,0) %	2243
\ ***БР***	1/2(0")	**5274,2 ±2,8**		***в \ {W CC) ГРтЛтг-***	(13 ± 9) %	2298
					(2,6 ± 1,9) %	2253
в®, в" (без разделения)			(14±4) . 10-и	V + адроны	(13 ± 1,3) %	–
				fjii V + адроны	(12,4 ±3,5) %	–
				Z)» + всё	(80 ±28) %	–
				/С + всё	Обнаружен	—
				р + В С ё	> 3 , 6 %	—

Частица	Квантовые числа Сп	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная	$ШВ_1$с
				Л -t- всё е+е- + всё [л+р.- + всё	>2,2®/о < 0 , 8 % < 0 , 7 %	-
			Нестранные барионы			
	1/2(1/2+)	,2796 ± 0,0027	Стабилен, т^ Ю^^ лет			
	1/2 (1/2+)	939,5731+0,0027 $m_n - m_p$ = =—1,293323 ± ±0,000016	898 ± 16			
			Бариты со странностью S = — 1			
	О (1/2+)	1115,60 ±0,05 S= 1,2 "«д — Wjo = = — 76,86 (8)	2,632 (20) • 10-1в S = 1,6	***рп-*** ***n7Z«***	(64,2±0,5) % (35,8±0,5) %	100 104
				ре--. дх-v	(8,37±0,14).10-^ (1,57±0,35).10-^	163 131
				рп-ГГ	(8,5±1,4).10-«	100
	1(1/2+)	1189,36±0,06 S = 1,8 — m ^ - = -7,97 (7) S = 1,3	0,800(4) . 10-1" Г (S+ г+иу) < 0 , 0 4	***рко*** ***m&*** ***fn***	(51,64 ±0,30) % (48,36 ±0,30) % (1,20 ±0,13) X X 10-3, S = 1,2 (4,5±0.5).10-«	189 185 225 185
				Ле+v **njx+v** **пг+v** ***ре*е-***	(2,0 ± 0,5)-10-5 < 3 , 0 • 10-5 <5-10-'' <7-10-«	71 202 224 225
	1 (1/2+)	1192,46 (8)	5,8(1,3) • 10-2»	**Af** **Ае+е-** **А я**	100% 5,45 • 10-3 **< 3 %**	74 74 74
	1 (1/2+)	1197,34 (5) Wjo — m^- =	1,482(11) • 10-1» S== 1,3	***тг*** ***пе-ч***	100% (1,022±0,034) X X 10-3	193 230
				п[х-v **Ае-v** ***п-К-t***	(0,45±0,04).10-3 (5,74±0,27).10-§ (4,6±0,6).10-*	210 79 193
			Барионы со странностью S ••	— 2		
	1/2 (1/2+)	1314,9(6) /Пдр —m^- = = -6,4(6)	2,90 (10) • 10-1»	**АТЬ»** АТ SOy ***рк-*** ре-v S+e-v **S-e+v** **S+^i-v** **S-f.+v** /V-v	100% (0,5 ±0,5) % <7 % <3,6.10-5 <1,3-10-3 <1,1-10-3 <0,9-10-3 < 1 , Ы0-з <0,9.10-3 <1,3.10-®	135 184 117 299 323 120 112 65 49 309

Продолжение табл. 34.3

Частица	Квантовые числа *i H j n c* ^	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	MSB/f
E-	1/2(1^)	1321,32(13)	1,641 (16)-10-"	Ля-	100%	139
				Ле-v	(5,5 ±0,6)-10-^	190
				See-v	(8,7 ± 1,7)-10-ь	123
					(3 ,5± 3,5)-10-''	163
				2V-V	< 8 . 10-"	70
					< 1,9 • 10-®	303
				гисч	< 3,2 • 10-3	327
				щхг-^	< 1,5%	313
				2-T	< 1,2 • 10-3	118
				ря-я-	< 4 - 10-"	223
				pjt-e-v	< 4 . 10-"	304
					< 4 • 10-"	200
				SOfi-v	< 2 , 3 - 10-3	6
			Барион со странностью S = - 3			
S-	0 (3/2^)	1672,45 (32)	0,819 (27)-10-1®	*КК-*	(68,6+1,3) %	211
				EOя-	(23,4+1,3) %	294
				3-я"	(8,0+0,8) %	290
				BOe-v	- 1 %	319
				E0(1530)я-	~ 2 • 10-3	–
				Ля-	< 1,3 . 10-3	449
					< 3 , 1 • 10-3	314
			Нестранный очарованный барион			
Л+	0(1/2^)	2282,2 (3,1)	2,3 + 10W 10-18	*pK-Ti'*^	(2,2 + 1,0) %	820
		5 = 1 , 8		*pK''*	(1 , 1 + 0 , 7) %	870
					< 4 %	751
					(0,6 + 0,5) %	861
					< 3 , 1 %	804
					Обнаружен	822
				pK"*	(0,48 + 0,30) %	681
				A++K-	(0,45 + 0,27) %	706
					Обнаружен	575
				+ всё	(4,5 ± 1,7) %	–
				ре+ + все	(1,8 + 0,9) %	–
				Ле+ + всё	(1 , 1 + 0 , 8) %	–
				Л + в с ё	(33 ±29) %	

Таблица 36.5. Характеристики мезонных резонансов [5]

Частица	Квантовые числа $I^{G}(J^{PC})$	Масса покоя М. МэВ	Полная ширина Г. МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность.%	p_c МэВ/с
			Нестранные мезоны			
^(770)	1 ^ 1 -) -	769 (3)	154 (5)	яте	- 100	358
		для Р®	для Р®	Т1Х	0,046 ±0,005	372
					0,0067 ±0,0012	370
				е+е-	0,0046 ± 0,0002	384
				ЧТ	Обнаружен	189
« (783)	0 - (1 -) -	782,6(2)	9,9(3)		і 9 , 9 ± 0 , 5	327
		S = 1,1			8 , 7 ± 0 , 5	380
				Т1+ЖС-	1 , 4 ± 0 , 2	366
					0,010 ±0,002	349
				е^ег	0,0067 ± 0,0004, S = 1,2	391
				Гу	Обнаружен	199
Ч· (958)	0^(0-) +	957,57 (25)	0,29(5)	ТЩПЦ	65,3 ± 1,6	231
				рпТ	30,0 ± 1,6	170
				со-,	>,8 ±0,5	159
				п	1,9 ±0,2	479
					0,009 ±0,002	467
S(975)	0^(0+)+	975(4)	33(6)	ТСП	78 ± 3	467
или		S = 1,4		*КК*	2 2 ± 3	—
S*						
8 (9S0)	1- (0+) +	983 (2)	54(7)	ТЈП	Обнаружен	320
				ш		–
?(1020)	0-(1-) —	1019,5 (1)	4,22 (13)		49,3 ± 1,0, S = 1,3	127
		S = 1,2			34,7 ± 1,0,5 = 1,3	ПО
				тг+я-тс"	14,8±0,7, S = 1,2	462
				ТТУ	1,2± 0,2, S = 1,4	362
					0,14 ±0,05	501
				е+е-	0,031 ±0,001	510
					0,025 ±0,003	499
				ЖС+ЖС-	0,02 ±0,01	490
Я(1190)	0 - (1 +) -	1190(60)	320 (50)	ря	Обнаружен	327
В (1235)		1234 (10)	150 (10)	ШС	»	350
/ (1270)	0+(2+) +	1274 (5)	178 (20)		84,3± 1,2	622
				2Я+27С-	2 , 9 ± 0 , 4 , S = 1,2	559
				кк	2 , 9 ± 0 , 2	398
					0,0015 ±0,0002	637
				I V 2 . 0	Обнаружен	562
А (1270)	1-(1+) +	1275 (30)	315 (45)	ря	Доминирует	389
или *Ai*					< 0 , 7	599
D (1285)	0^-(1+) +	1283 (5)	26 (5)	*ККп*	11 ± 3	302
					4;9 ± 6	482
				4я (вероятно, ряя)	40 ± 7	564
				ST.	36 ± 7	236
£ (1300)	0+ (0+) +	~ ГЗОО	200—600	тот	-90	635
				КК	~ 10	418
				ш	Возможно, обнаружен	348
7l (1300)	1-(0-) +	1300 ± 100	200-600			612
				ре	Обнаружен	407
4 (1320)	1- (2+) +	1318 (5)	110 (5)	ре	70,1 ± 2,2	419
				ТЈП	14,5± 1,2	534
					10,6±2,5	361
				7i	4,9 ± 0,8	434

Продолжение табл. 34.3

Частица	Квантовые числа	Масса покоя *M*, МэВ	Полная^^ина	Продукты распада	Относительная вероятность, %	Мэ^В/.
				г / я	< 2	286
				TZF	0,27 ±0,06	652
				n	0,0007+ 0,0002	659
E (1420)	***ОЧП +***	1418 (10)	52 (10)	***КК:*** (включая ***+ кк*)***	Обнаружен	423
					Возможно, обнаружен	565
				5m.		**348**
1 (1440)	0+ (0-) +	1440 (10)	76 (10)	ККп (включая + + ***КК-)***	Обнаружен	441
				Г		579 366
Г (1525)	**0^2-) +**	1525 (5)	70 (10)	***m*** тсЬ	Доминирует Возможно, обнаружен	578 750
				тт	0,0011 ±0,0002	763
р (1600) или р'	**1 4 1 -) -**	1590 (20)	260 ± 100	4г. (включая рте'^л-. ***А^m!)***	±0 ± 7	733
				тстс	23 ± 7	783
					9 ± 2	377
				Kjr.Jl	7 ± 2	669
				КК	±0,5	623
				e+e-	0,003 ±0,001	795
to (1670)	O - (3 -) -	1668 (5)	166 (15) S = 1,1	37t	Обнаружен	806
				рп		64«
				5л		740
				6)ЛЛс (вероятно, ***Вп)***		616
Л (1680) или ***As***	**1- (2-) +**	1680 (30)	250 (50)	/ я	53 ± 5	336
				рпе	34 ± 6	656
					9 ± 5 '	813
					4 ± 1,4	459
<Р(1680) или tp'	o - (1 -) -	1685 (10)	150 (30)	***+ к* к***	Доминирует	466
				и п я	Обнаружен	624
				кэс		683
				e*ez		842
				л+я-п®	Возможно, обнаружен	814
g (1690)	1+ (3-) -	1691 (5)	200 (20)	2п	23.8 ± 1,3	834
				4ЖС (включая ятср, рр, Лгя, юя)	70.9 ± 1,9	787
				ККп (включая ***К*К+К*)***	3,8 ± 1,2	625
				КК	1,5 ±0,3	686
е (1690)	0+ (2-) +	1690 (30)	180 (50)	'i1	Обнаружен	643
				КК		683
<Р(1850)	0 : (3 -) -	1853 (10)	96 ±32	***КК***	Обнаружен	784
				к*к + к*к	J	601
h (2030)	0+ (4+) +	2027 (12)	220 (30)	•ЯП	17 ± 2	1004
				КК		883
^С (2980)	0 ^ 0 -) +	2981 (6)	< 2 0		Обнаружен	1426 1458
				f b . - ***pp***		1343 1158

Частица	Квантовые числа	Масса покоя *М.* МэВ	Полная ширина Г. МэВ	продукты распада	Относительная вероятность, %	*p*, МэВ/с
J/ф (3100)		3096,9 (1)	0,063 (9)	e+e-	7,4± 1,2	1548
				Адроны + излучение	7,4± 1,2 85 ± 2	1545
				Распады в стерильные адроны		
					3,7±0,5	1496
					2,9±0,7	1433
					1,2 ±0.3	1368
				4 (П+Я-) яо	0,9±0,3	1345
				Я+Я-/С+/С-	0,72 ±0,23	1407
				рря+я-	0,53 ±0,06	1107
				2	0,4±0,1	1517
				3 (я-^,^-)	0,4±0,2	1466
				ппгЛп-	0,38 ±0,36	1106
				SS	0,32 ±0,08	818
				2(г+я-) Я^/С-	0,31 ±0,13	1320
					0,26 + 0,07	1440
				2+2-	0,24 + 0,26	988
				РР-П	0,23 ±0,04	948
				РР	0,22 ±0,02	1232
				рш- илн ***рпзс****	0,21 ±0,02	1174
				пп	0,18 ±0,09	1231
					0,16±0,06	1033
				SOS"	0,13 + 0,04	988
				ЛЛ	0,11 + 0,02	1074
					0,11 ± 0,01	1176
				2 (К+К-)	0,07 ±0,03	1131
				к*к-	0,022±0,008	1468
				Я+П-	0,011±0,005	1542
				ЛТ	<0,015	1032
					<0,009	1466
				\е рвзонансы		
				Р?\	1,22 ±0,12	1449
					0,85 ±0,34	1392
					0,84 ±0,45	1126
				шял	0,68 ±0.19	1435
				(892) /С*о (1430) + + с.	0,67 ±0,26	1009
				К± Г Т(892)	0,34 ±0,05	1373
				В±(1235)гТ	0,29 ±0,07	1298
				W * " (892) ± с. с.	0,27 ±0,06	1370
				со/	0,23±0,08, 5=1,2	1143
				tf7t+7C-	0,21 ± 0,09	1365
				Ч'РР	0,18±0,08	596

Продолжение табл. 36.5

Частица	Квантовые числа	Масса покоя *M, МэВ*	Полная ширина Г. МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	*p*, МэВ/с
					0,18 + 0,08	1176
				ь>рр	0,16 ±0,03	768
					0,16 + 0,10	1265
					0,10 + 0,06	1320
				<P/' (1525)	0,037 ±0,013	871
				<fS (975)	0,026 + 0,006	1184
					< 0,43	1263
				/С*" (1430) К"*" (1430)	< 0,29	606
				К^*" (1430) + **с. с.**	< 0,2	1158
				(1430)	< 0,2	1159
					< 0,15	1318
					< 0,13	1192
				к*" (892) К*" (892)	< 0,05	1261
				«Р/	< 0,037	1037
				с./' (1525)	< 0,016	1003
			Радиационные	***распады***		
				Т2 (^-ь^-)	0,49 ±0,17	1517
				ТРР	Обнаружен	1344
				Г (1440) **уККл**	0,42 + 0,12	1214
				г Y	0,36 ±0,05	1400
				Т/	0,15 + 0,04	1286
				тч	0,086 ±0,009	1500
					0,007 + 0,005	1546
				rrj (2980; те (1690)	Обнаружен	114 1087 1487
				rD (1285)	< 0,6	1283
				2т	< 0,05	1548
				Т/' (1525)	< 0,03	1173
				W	< 0,01	1232
				зт	< 0,006	1548
С(3415)	0+ (0+) +	3415 (1)	—	**2(тс+я-) (включая тсяр)**	4,3 + 0,9	1679
					3,4 + 0,9	1580
				(включая *izKK*)*		
				3 (71+Я-)	**1**,7 ± 0,6	1633
					0,9 ± 0,2	1702
				т//'!^ (3100)	0,8 + 0,3	303
					0,8 ±0,2	1635
				рр2*71-	0,6 ± 0,2	1320
^(3510)	**0^(1+)+**	3510,0 (6)	—	Т(//W (3100)	2 8 + 3	389
				3 (Я+Я-)	2,4 ± 0,9	1683
				2(я+7с-) (включая JtJp)	**1**,8 ± 0,5	1727

Примечание. ***с. с.*** - зарядоао-сопряженная пара частиц; с. с. = (1430).

Продолжение табл. 36.5

Частица	квантовые числа *j H j n c ^*	Масса покоя, М, МэВ	Полная ширина Г, МэВ	Продукты распада	Отиосительная вероятность, %	МэВ/с
					1,0 ±0,4	1632
				(включая т.КК*)		
				я+г-рр	0,15±0,10	1381
X (3555)	0+ (2+) +	3555,8 (6)	–	Т (//ф) (3100)	15,5± 1,8	429
				2 (г.+7с-) (включая гдр)	2,3 + 0,5	1750
				(включая	2.0+0,5	1656
				^*КК*)*		
				3 (^-^тг-)	1,2 + 0,8	1706
				я+я-рр	0,35± 0,14	1410
				тг+тс-	0,20 ±0,11	1772
				*к*к-*	0,16 + 0.12	1708
4^(3685)	**о - (1 -) -**	3686,0 ±0,1	0,215 ±0,040	*е^е-*	0,9±0,1	1843
		'"ф (3685) —			0,8 + 0,2	1840
		'^'li (3100) ~ = **589,06(13)**				
				Адроны + излучение	98,1 ±0,3	—
				Распады в cidpoHbt		
				(//ф) я+п-	33 ±2	477
				(Л^) попо	17 ± 2	481
					2,8±0,6	196
				2 (7.V-) я»	0,35 ±0,15	1799
					0,16±0,04	1726
				{ т	0,10±0,03	528
				РрЯ+71-	0,08 + 0,02	1491
				К*® (892) К + с.с	0,067 ±0,025	1674
				2 (it+x-)	0,05 ±0,01	1817
					0,042 ±0,015	1751
				РР	0,019 + 0,005	1586
				3 (Л -)	0,015±0,010	1774
				*к*к-*	0,010 ±0,007	1776
				тс+я-	0,008 ±0 ,005	1838
				рш	< 0 , 1	1760
				А Л	< 0 , 0 4	1467
				Радиационные распады		
				п (3415)	8,2+1,4	261
				П (3510)	8,0 ± 1,3	172
				•а (3555)	7,4+ 1,3	128
				Tic (2980)	0,43 ±0,26	638
				Tie (3590)	От 0,2 до 1,3	91
					< 0 , 5	1841
				T'!	< 0 , 0 2	1802
				TV	< 0 , 0 2	1719
				fi (1440) ^ *tKKK*	< 0 , 0 1 2	1562

Продолокение табл. 36.5

Частица	Каантовые числа *iHsnc^*	Масса покоя М, МэВ	Подаа^ширина	Продукты распада	Относительная вероятность, %	МэВ/f
4- (3770)	(1 -) -	3770 (3)	25 (-3)	e+e-	0,0011 ±0,0002	1885
		'"•р (3770) ~ ~ '",р (3685) = -83,9 (2,4)		***DD***	Доминирует	242
		S = 1,8				
ф (4030)	(1 -) -	4030 (5)	52 (10)	e+e-	0,0014 ±0,0004	2015
				Адроны	Доминируют	
				DD		752
				DD** + 0*Ъ	Обнаружен	559
				D*D*		177
ф (4160)	(1 -) -	4159 (20)	78 (20	e+e-	0,0010 ± 0,0004	2079
				Адроны	Доминируют	
ф (4415)	(1 -) -	4415 (6)	43 (20)		0,0010 ±0,0003	2207
				Адроны	Доминируют	
Г (9460)	(1 -) -	9460,0 (3)	0,0443 (66)		2,9 ±0,5	4729
или Г (IS)		S = 1,6		e+e-	2,5 + 0,5	4730
				T+t-	3,4 ±0,8	4381
	( ) +	9872,9 (5,8)	-	(9460)	Обнаружен	404
или *xb* (l^Po)						
гь (989ф	**( ) +**	9894,5 (3,5)	—	тГ (9460)	43 ± 11	425
гь (9915) или хь (1 "Pi)	**( ) +**	9914,6(2.4)	—	7Г (9460)	20,0 ±4,4	444
Г (10025)	(1 -) -	10023,4 (3)	0,0296 (47)	(xV-	1,9 ± 1,8	5011
или Г (2S)		'"г (10025) — — '"г (9460) = = 563,3 (4)		*e^e-*	1,6±0,3	5012
				Г (9460) Tüt	19,5 ± 1,7	476
				Ш (9875)	3,5±1,4	149
				Ш (9895)	5,9± 1,4	128
				Ш (9915)	5,1 ± 1,4	108
lb (10255)	**(> +**	10253,7 (3,4)	—	ТГ (9460)	**1 Обнаружен**	763
илихИ2='Р1)				*11* (10025)		228
ГЬ (10270)	( )4>	10271,0(2,4)	—	^*Y* (9460)	**Обнаружен**	779
ИЛИХ6				f1 (10025)		245
Г (10355)	(1 -) -	10355,5 (5)	0,0177 (51)	*e*e-*	2,0 ±0,7	5178
ИЛИ Г (3S)					3,3±2,0	5177
		'"г (10355) '"г (9460) = = 895,5 (6)		Г (9460) тс+л-	0,1±1,1	814
				Г (10025)	3 ± 3	177
				Ш (10235)	7,6±3,5	122
				Ш (10255)	15,6 ±4,2	101
				П6 (10270)	12,7±4,1	84
Г (10575) или Г (4S)	**(1 -) -**	10573 (4) '"г (10575) — — '"г (9460) = -1113(4)	14(5)	e+e-	0,0017 + 0,0007	5286

Частица	Квантовые числа	Масса покоя M_0, МэВ	Полная ширина Г, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	МэВ/с
			Странные мезоны			
K^* (892)	$1/2(1^-)$	892,1 (4) S = 1,4 $m^- - m^+$ = = 6,7 ± ± 1,2 МэВ	51,3(1,0) S = 1,1	$K\pi$ $K\gamma$	~ 100 0,10±0,01 <0,05	288 309 216
Q (1280) или Qi	$1/2(1^+)$	1270 (10)	90 ± 20	K_1 (1350) $K\rho$ K^* (892) $K\rho$ $K\pi$ $K_2\gamma$	42 ± 6 28 ± 4 16 ± 5 11 ± 2 3 ± 2	45 – 298 — –
K_1 (1350)	$1/2(0^+)$	~ 1350	- 250		Обнаружен	574
Q (1400) или Qa	$1/2(1^+)$	1406 (10)	184 (9)		94 ± 6	403
				$K\rho\gamma$ $K_2\gamma$ $K'_1\gamma$	3 ± 3 2 ± 2 1 ± 1	299 — 285
K^* (1430)	$1/2(2^+)$	**1425 (5)**	100 (10)	$K\pi$ K^* (892) $\pi\gamma$ K^* (892) $\pi\rho$ $K\rho$ $K<f>$ $K\gamma_1$ $K_1\gamma$	44,8+2,3, S=2,7 24,5+2,0, S=1,1 13,0+2,6, S=1,1 8,8± 1,0 S = 1,2 4,2 ± 1,5 5 + 5 0,24 ±0,05	618 417 366 324 310 485 627
L (1770)	$1/2(2^-)$	~ 1770	- 200	K^* (1430) $\pi\gamma$ K^* (892) $\pi\pi$ K_f $K\pi_f$	Доминирует Обнаружен	286 651 – 816
K^* (1780)	$1/2(3^-)$	1780 (10)	160 (20)			796
				$K\rho$ K^* (892) $\pi\gamma$ $K\pi$	Велика 17 ± 5	620 657 815
K* (2060)	$1/2(4^+)$	2060 (30)	210 ± 40	$K\pi$ K^* (892) $\pi\pi$ $\rho K\pi_2$ K^* (892) $\pi\rho$	7 ± 1 ? Обнаружен	966 809 751 744 775
			Очарованные нестранные мезоны			
D*+(2010)	$1/2(1^-)$	2010,1 (7) $m_{D^{*+}} - m_{D^+}$ = = 145,4 ± + 0,2 МэВ	< 2,0	$D^+\gamma$	64 ± 11 28 ± 9 8 ± 7	39 38 136
D*o (2010)	$1/2(1^-)$	2007,2(2,1)	**< 5**	$D^0\gamma$	55 ± 15 45 ± 15	44 137

Таблица 36.6. Характеристики барионных резонансов [5]

Квантовые числа	Импульс ^эВ/с			Продукты распада	Относительная вероятность, %	
	Нуклонные резонансы N, S 0. I = 1/2					
.1/2 (1/2+) P'н	**0,61**	1400—1480	1200—350 **(200)**	*Nr.*	50—70	397
				*N^*	8 - 1 8	—
				Nun	- 3 0	342
				An	12—28	143
				Щ	~ 7	
				Nz	- 5	–
l/2(3/2)-)D,3	0,74		100—140 (125)	*Nn*	50—60	456
				Щ	- 0 , 1	149
				Nnn	35—50	410
				Ая	15—25	228
				Nf	15—25	
				Nb	< 5	–
l/2(1/2-)S„	0,76	1520—1560	100—250 (150)	*Nn*	35—50	467
				*N^*	- 3 5	182
				Nun		422
				Дис	~ 1	242
				Щ	~ 3	
				NB	~ 2	–
1/2(1/2") S„		1620-1680	100-200 (150)	*Nn*	55-65	547
				N•4	- 1 , 5	346
				Л/С	~ 8	161
				SK	3—10	
				Nnn	- 3 0	511
				An	4—15	344
				Nf	- 2 0	
				Ne	< 5	–
1/2(5/2-)Z),5	**1,01**	1660-1690	120-180 (155)	*Nn*	30—40	563
				N^i	- 1	374
				AK	- 0 , 1	209
				Nnn	55—70	529
				An	50—65	364
				Ne	- 5	–
1/2 (5/2+) F.	**1,01**		110—140 (125)	*Nt.*	55—65	567
				*N^*	< 1	379
				Nnn	- 4 0	532
				An	- 1 2	369
				Np	- 1 0	–
				Nb	- 2 0	–
1/2(3/2-)D,;	1,05	1670—1730	70—120 **(100)**	*Nn*	8—12	580
				Nri	~ 4	400
				Л/С	- 0 , 2	250
				Nnn	- 8 5	547
				An	15—40	385
				Nf	- 5	–
				Nl	< 4 0	–
1/2 (1/2+) p;;	1,07		90—130 **(110)**	*Nn*	10—20	587
				Nri	- 2 5	410
				AK	- 1 5	264
				m	2 - 1 0	138
				Nniz	> 5 0	554
				An	10 - 2 5	393
				Nf	25 - 6 5	48
				Nk	15 - 4 0	–

Продолокение табл. 36.5

Квантовые числа П Л . , , , ,	Импульс "гэВ/с	Масса покоя *М.* МэВ	Полная ширина Г, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность. %	*p* МэВ/с
1/2(з/2+)р;;	1,09	1690-1800	125—250 (200)	*Nn*	10—20	594
				Nfi	- 3 , 5	420
				A/C	~ 5	278
				2/C	2—5	162
				Nun	- 7 0	561
				Дя	- 2 - 0	401
				Nf	45—70	104
				NJ	- 2 0	
1/2 (7/2-Gi,)	2,07	2120—2230	200-500 (350)	*Nn*	- 14	888
					~ 3	790
1/2 (9/2+) H^,	2,14	2150—2300	300-500 (400)	*fk*	- 0 , 3	712
				Ntz	- 1 8	905
					- 0 , 5	8!1
				s	- 0 , 2	732
1/2(9/2-)G;9	2,21	2130—2270	200—500 (300)	*Ntz*	- 1 0	923
					- 2	831
					- 0 , 3	754
1/2(11/2-)/ш	3,12	2580—2700	>300 (400)	*Ntz*	~ 5	1126
	Дельта-резонансы Д, S=>0, *1—3/2*					
3/2 (3/2+) />33	0,3(	1230-1234	110—120 (115)	*Niz*	99,4	227
				Ni	0,6	259
3/2 (1/2-) S^i	0,91	1600—1650	120—160 (140)	*Ntz*	•25—35	526
					- 7 0	488
				An	35—50	318
				Nf	<40	—
3/2 (3/2-) o;з	1,05	1630—1740	190^00 (250)	*Nn*	10—20	580
				Nn-si	- 8 5	547
				An	<50	385
				Nf	- 4 0	
3/2(1/2") s;;	1.44	1850—2000	130-300 (150)	*Nn*	6 - 1 2	710
				XK	- 1 0	410
8/2(5/2^)^35	1.45	1890—1920	250-400 (300)	*Nn*	8—15	713
					< 3	415
				Nnn	- 8 0	687
				An	10—30	542
				Nf	- 6 0	421
3/2(1/2+) p;;		1850-1950	200—330 (220)	*Nk*	20-25	716
				s/c	2—20	421
				Nnn	>40	691
				An	Мала	545
				Nf	<40	426
3/2(3/2+) P^з	1,48		190—300 (250)	*Nn*	14—20	722
				XK	- 5	431
	1,50		150—350 (250)	*Nn*	4—14	729
				SK	<10	441

Продолжение табл. 37.1

Частица	Квантовые числа	Импульс "г^В/f	Масса покоя М, МэВ	Полная ширина Г, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	М^ЗВЗл
Д(1950)	3/2 (7/2+) F;^	1,54	1910—1960	**200-340 (240)**	***хк***	< 1	460
					Ni^	35-45	741
					N-K-K	- 60	716
					Amc	- 40	574
						- 20	469
Д (2420)	3/2 (11/2+) Язи	2,64	2380—2450	**300—500 (300)**	***2***	5—15	1023
	I(JP)Lj,2i	***Лямбда-резонансы*** A, S =		1, ***1 = 0***			
	0(1/2-)S;,	Ниже (К-р)-поро-	1405±5	40+10		**100**	152
			1519±1,0	15,6+1,0	*NK*	45(1)	244
					Stc	42(1)	267
					Ailx	10(1)	252
					Xtz-K	0,9(0,1)	152
					At	0,8(0,2)	351
	O (1/2^) я;,	0,58	1560-1700	50—250 (150)	*NK*	15-30	343
					Xn	10—60	336
	0(1/2-) s;;	0,74	1660—1680	25-50 (35)	*NK*	15-25	414
					Xtz	20-60	393
						15-35	64
		0,78		50-70 **(60)**		20—30	433
					Xtz	20—40	409
					ATZTZ	- 25	415
					Itzjz	- 20	350
	0(1/2-)Soi'		1720—1850	200—400 (300)	*NK*	25—40	528
					Xtz		
					S0385)7l	Обнаружен	
					n X * (892)		
	0 (1/2+) p;;	**1,01**	1750—1850	50—250 (150)	*NK*	20-50	
					Stc	10-40	
					2 (1385) Jc	Обнаружен	
					*NK** (892)	30-60	
	0 (5/2+) f^s		1815-1825	70-90 **(80)**	*NK*	55-65	
					Sti	8-14	
	0 (5/2-) Dob	**1,08**		60-110 (95)	S 0385) тс	5-10	
						3-10	
					Stc	35-75	
					2 (1385)X	> 15	
	0 (3/2+) Яоз	1,21		60-200 **(100)**	*NK*	20-35	
					Stc	3-10	
					X(1385) Tc		
					*NK** (892)	I Обнаружен	
	0(7/2-) Go,	**1,68**	2090-2110	100-250 **(200)**	*NK*	25-35	
					Stc	~ 5	
					il	< 3	
					Aco	< 3	
					*NK** (892)	**< 8**	
						10-20	

Продолжение табл. 37.1

Частица	Квантовые числа	Импульс пучка, ГэВ/с	Масса покоя М, МэВ	Полная ширина Г, МЭВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p_c, МэВ/с
A(2110)	0 (5/2+) F;;	1,70	2090-2140	**150-250 (200)**	*NW*	5-25	757
					Xn	10-40	711
					Ao)	} Обнаружен	455
					2(1385)71		589
					NK{892)*	10-60	524
A (2350)	0(9/2+)	2,29	2340-2370	**100-250 (150)**	*'NK*	-12	915
					S7l	~10	867
		Сигма-резонансы S, *S* = — *1,* / = 1					
	J (3/2+)	Ниже(/С-р)-порога	(+) 1382,3 (0,4), S=1,6 (0) 1382,0 (2,5), S=1,6 (-) 1387,4 (0,6), S=2,2	35(1), S = **= 1,0** -35			
				m2), s-			
		0,72	1630-1690	40-200 (100)	*NK*		
					ATZ	• Обнаружен	
					Xn		
	1 (3/2-) D;;	0,74	1665-1685	40-80 **(60)**	*NK*	7-13	
					ATl	5-15	
					STl	30-60	
	1(1/2-) s'Ti,	0,91	1730-1800	60-160 (90)	*NK*	10-40	
					At	Обнаружен	
					ITZ	**<8**	
						15-55	
	1 (5/2-) DiB	0,96		105-135 **(120)**	***l i***	37-43	
					A-K	14-20	
					XTZ	2-5	
					S (1385)71:	8-12	
					A (1520)71	17-23	
	1 (5/2+) f'1s		1900-1935	80–160 (120)	*NK*	5-15	
					A-K		
					STl	• Обнаруже]	
					S J1385) 71	< 5	
	1(3/2-)/);;'		1900-1950	150-300 **(220)**	*NK*	**<20**	
					ATC		
					Xtz		
					X (1385) 7t	Обнаружен	
					A (1520)_7t		
					Aj(_1232)/C		
					*NK *{S92)*		
	1(7/2+)Fi,	1,52		150-200 **(180)**	*NK*	17-23	
					A-K	17-23	
					S7l	5-10	
					S/C	**<2**	
					S (1385) 7t	5-15	
					A (1520)^	10-20	
					Д0232) *K*	10—20	
					NK *(892)	< 5	

Продолжение табл. 37.1

Частица	Квантовые числа	Импульс пучка. ГэВ/f	Масса покоя М, МэВ	Полная ширина Г, МэВ	Продукты распада	Относительная вероят-	МэВ/f
S (2250)	I (?)	2,04	2210—2280	60-150 (100)	*NK*	<10	851
					А-к	1 Обнаружен	842
					271		803
	I(JP)L2I, 2J	***К.аскадные резонансы*** S S = ~2 , / = 1/2					
S (1530)	1/2 (3/2+)/>13		(0) 1531,8(0,3) 5 = 1,3	9,1 (0,5)			148
			(-) 1535,0(0,6)	10,1 (1,9)			
E (1820)	1/2 (3/2)		1823 (6)	20		-45	
					ХГ	**-10**	
					Ел	Мала	
						-45	
E (2030)	1/2 (?)		2024 (6)		3_(^1530)	-20	
					SK 3 (1530)		

ет, что в данном столбце таблицы приведены каналы распада частицы = т" и т. п.), которые представляют собой также каналы распада частицы а+(а+ = Il+, т+ и т. п.) после замены всех продуктов распада зарядово-сопряженными.

В тех случаях, когда среднее время жизни указано через массу частицы, для получения времени жизни частицы в секундах необходимо подставить ее массу в мегаэлектрон-вольтах. Иногда вместо среднего времени жизни приводится средняя ширина состояния Г в энергетических единицах.

36.7. МЕЗОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ

Зарядовая четность нейтральных мезонных резоианс ов с нулевыми странностью, очарованием и другими характеристиками, входящих в состав изотопического мультиплета, обозначается символом ***С„***. Надежно установленные квантовые числа мезонных резоианс ов в табл. 36.5 подчеркнуты; отсутствие черты означает, что указанные квантовые числа наиболее вероятны. Цифры в скобках после символа частицы, например К* (892), означают массу частицы в мегаэлектрон-вольтах и служат для идентификации данной частицы. Остальные обозначения те же, что в табл, 36.4.

36.8. БАРИОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ

В табл. 36.6 в колонке «Импульс пучка» приведены значения импульса ***р*** первичных частиц (я- или /С-мезонов), отвечающие образованию соответствующего барионного резонанса в п (/Ор-соударения в лабораторной системе отсчета. Символ La/. 2J является спектроскопическим обозначением барионных резонансов со странностью 5 = 0, —2; символ ***L„*** 2/ — спектроскопическим обозначением барионных резонансов со странностью S = —1; ***L*** — символ орбитального состояния мезона и бариона, образующих данный резонанс, причем символам ***S, P, D, F ...*** отвечают значения орбитального квантового числа L = 0, 1, 2, 3 ... соответственно. Штрихами при спектроскопическом символе различают состояния с одинаковыми квантовыми числами. В колонке «Полная ширина Г» в скобках приводится предпочтительное значение этого параметра. Остальные пояснения те же, что в § 36.6, 36.7.

36.9. МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

fXB=eli/(2m, 0=0,57883785- IQ-i" МэВ/Тл - магнетон Бора для электрона;

= eli/(2/np.c)= 0,2799541 • IQ-i^ МэВ/Тл - магнетон Бора для мюона;

цд,=eГ1/(2трС)_3,1524515-10-" МэВ/Тл — ядерный магнетон Бора,

Магнитный момент [5]

1,001159652209 (31) f^^

1,001165924 (9) (x^

2,7928456 (И)

-1,91304184 (88) fx^

-0,613 (4) (x^

2,379 (20) (x^

-1,10 (5) ^^

-1,250 (14)

-1,85 (75)

Таблица 36.7. Параметры распада элементарны* частиц

Схема распада		9. град	1	д, град
А	рт.-	0,642+0,013	-6,5±3,5	0,76	7,7+4,1
Л	пт°	0,646+0,044	–		–
	рт.о	-0,979+0,016	36+34	0,17	187+6
	^ ПтО	0,068+0,013	167+20	0,97	
		0,72+0,29	—	—	–
I-	пп-	—0,068+0,008	10+15	0,98	249+Jfe
	Е» Amzo	-0,413+0,022	21 + 12	0,85	
Е-	^ Ап-	-0,434+0,015	2+6	0,90	184+12
Q-	АК-	—0,10+0,38		–	

36.10. ПАРАМЕТРЫ РАСПАДОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Пусть ***S и P*** — амплитуды вероятностей распада на две частицы, находящиеся в s- и p-состояниях по относительному орбитальному моменту. Тогда

$$\frac{2|S||P|\cos A}{' \quad isp + |pp \bullet} \qquad \frac{-2|S||P|\sin A}{}$$

$$\text{fi} = \quad -\text{«2 sin} \quad = \quad \_ \text{„2 cos <f.}$$

Значения а, ф, v, А приведены в табл. 36,7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий: Пер. с англ. М.: Мир, 1975.
2. Клоуз Ф. Кварки и партоны. Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
3 Окуиь Л. Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981,
4. Андреев И. В. Хромодинамика и жесткие процессы при высоких энергиях, М.: Наука, 1981.
5. Reviews of particle properties/Rev. Mod. Phys, 1984. Vol. 56, № 2. Pt. II. P. S2—S304.

Глава 37
ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА НУКЛИДОВ

В. М. Кулаков

37.1. ТАБЛИЦА НУКЛИДОВ

В соответствии с общепринятой терминологией атомы с данным числом протонов и нейтронов в ядре принято называть ***нуклидами.*** Нуклиды с одинаковым числом протонов (т. е. принадлежащие одному химическому элементу) называют ***изотопами.***

В табл. 37.1 приведены все достоверно известные радиоактивные и стабильные нуклиды в порядке возрастания массового числа для каждого элемента. Данные расположены в шести колонках. В первой колонке приведен общепринятый символ элемента и его зарядовое число ***Z.*** Во второй колонке указано массовое число ***А*** [символ ***m,*** следующий за массовым числом, означает, что приведено метастабильное состояние нуклида; метастабильные состояния приведены лишь тогда, когда их периоды полураспада достаточно велики (>1 с), чтобы идентифицировать их независимо от основных состояний; символы nil и т2 означают различные метастабильные состояния одного нуклида]. В третьей колонке дан полный период полураспада нуклида на основании данных международного файла ENSDF — Evaluted Nucler Structure and Data File (в скобках указано стандартное отклонение А 7"i/2 в единицах младших разрядов приведенного числа).

В четвертой колонке приведен основной тип распада нуклида Использованы следующие обозначения: а—а-распад; р- — электронный распад; позитронный распад; э.з.—захват орбитального электрона; **B", Pp,** э.з.н, э.з.р — испускание нейтронов и протонов из возбужденных состояний, возникающих в результате Р-распада или захвата орбитального электрона; и п. — изомерный переход (распад из возбужденного метастабильного состояния с переходом на более низкий уровень); с.д. — спонтанное давление. Если у ядра существует несколько типов распада, то все они указаны в этой колонке. В ряде случаев за символом типа распада в круглых скобках приведена относительная доля (в процентах) способа распада, например, э.з. (60). Отсутствие скобок при наличии нескольких типов распада означает, что относительная доля распада не определена. Для стабильных нуклидов приведены (в процентах) значения относительной распространенности нуклида в земной коре. Данные взяты из [5] и соответствуют оцененным значениям, полученным в основном методом масс-спектрометрии, для основных земных образцов. Эти данные выделены полужирным шрифтом. Для радиоактивных нуклидов с очень большими периодами полураспада (поэтому сохранившихся в земной коре) указаны как процентное содержание, так и тип распада, например

87Rb Цифры в круглых скобках, приведенные

за значениями распространенности стабильных нуклидов, указывают стандартное отклонение в единицах младших разрядов. Эти погрешности перекрывают интервал как возможных естественных вариаций изотопного состава, так и экспериментальных погрешностей.

В пятой колонке указаны значения энергий (в мега-электрон-вольтах) групп наиболее интенсивных частиц (а, р-, Р+, ***n, p),*** испускаемых при распаде нуклида. В круглых скобках приведена относительная интенсивность групп частиц (в процентах) на полное число распадов. В косых скобках приведена относительная интенсивность групп частиц (в процентах) только для конкретного типа распада. Для сплошных р-- и Р+-спектров представлены, как правило, значения граничной энергии р-группы с наибольшей энергией. Если Р-группа с наибольшей энергией имеет относительно слабую интенсивность, то приводятся значения граничной энергии и интенсивности одной или нескольких Р-групп с меньшими граничными энергиями.

Таблица 37.1. Таблица нуклидов [1, *2J*

Элемент	*A*	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	Т,-излучения
iH	1	1 Стабилен	99,985 (1)	-	-
	2		0,015 (1)		
	3	12,33 (6) года	Р-	0,0186	–
гНе	3	1 Стабилен	1,38 (3)-10-«		
	4		99,999862 (3)	I	
	6	0,8081 (20) с	г	3.508	–
	8	0,122 (2) с	р-, р-«(12)	–	0,98 (88J
3Li]	6	1 Стабилен	7,5(2)	–	–
	7		92,5 (2)		
	8	0,842 (6) с	Р-	13	-
			2a	1,6	
	9	0,176 (2) с	Р-	13,61	-
			n	0,76	
	11	0,0085 с	Р", ***Гп*** (61)	—	–
4Be	7	53,44 (9) сут	Э. з.	—	0,477 ПО,3)
	9	Стабилен	100	–	–
	10	1,6 (2) 10" лет	R-	0,555	–
	11	**13,81 (8) с**	R-	11,5	\ 2,14(32); 4,67(2,1);
			р-а	0,77	/ 5,85(2,4); 6,79 (4,4); 7,99 (1,7)
	12	0,0114 (5) с	Р~	11,7	–
бВ	8	**0,769 (4) с**	гР^	14,1	–
			2а	8,3; 1,6	–
	10		19,9 (2)		
	И	1 Стабилен	80,1 (2)	–	
	12	0,02041 (6) с	р- 100)	13,37"	
			Р-За (1,5)	0,192(1,5)	} 4,43(1,3)
	13	0,01736(16) с	Р-, р-п (0,28)	13,44	**3,68(7)**
	14	0,0161 (12) с		14,0	**6,09; 6,73**
еС	9	0,1265 (9) с		8,2(60); 1,1(40)	
	10	19,42 (6) с	*'г*	1,87	0,^1 (200, ан); 0,717(100); 1,023(1,7)
	11	20,40 (4) мин		0,97	} 0,511 (200, ан.)
	12		98,90 (3)		
	13	1 Стабилен	1,10(3)	–	Z
	14	5730 (40) лет	Р-	0,156	–
	15	2,449 (4) с	Р-	9,82(32); 4,51 (68)	5,299(68)
	16	0,747 (8) с	Г п (> 98,8)	0,79; 1,72	–
	12	**0,01097 (4) с**	Г (~ 100)	16,4	0,511 (200, ан.); 4,43(2,4)
			За (~ 3)	0,195	–
	13	9,961 (4) мин	Р^	1,20	0,511 (200, ан.)
	14	1 Стабилен	99,634 (9)		
	15		0,366 (9)		
	16	**7,13 (2) с**		10,40 (26); 4,27(74)	2,75(1); 6,13(69); 7,11(5)
			«(0,0006)	1,7	–
	17	4,169(8) с	р-	**8,680,6); 7,81(2,6)**	} 0,87(3); 2,19(0,5)
	18	**0,63 (3) с**	р-	**0^40(45); 1,21(45);** 1,81(5) 9,4	0,82 (59); 1,65(59); 1,98(100); 2,47(41)
вО	13	0,0089 (2) с		6,40/100/; 6,97/24/	
	14	70,599 (22) с		4,12(0,6); 1,811(99)	0,511 (200, ан.); 2.312(99)
	15	**122,24(16) с**		1,74	–
	16		99,762 (15)	–	–
	17	V Стабилен	0,038 (3)	–	–
	18	1	**0,200 (12)**	–	–
	19	26,91 (8) с		4,60; 3,3	0,197 (97); 1,37(59)
	20	13,57 (10) с		2,8	1,06(100)
	21 [2]	3.4 с ^	*Г*	6,4	

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относитель	сивность, %)
	64,50 (25) с		1,74	0,511 (200, ан.)
	109,77 (5) мин		0,635	0,511 (194, ан.)
		э. з (3		
	Стабилен	**100**		
	11,03 (6) с		5,41	1,63(100)
	4,32 (3) с		**5,7; 5,3**	0,350/100/; 1,38/13/
	4,23 (4) с		11	1,28(100); 2,08(67); 2,17
	2,23 (14) с			
	0,109 (10) с		3,77; 4,59; 5,12	
	1,67 (2) с		3,42	0,511 (200, ан.); 1,04(7)
	17,40 (4) с		**2,22**	0,511 (200, ан.)
		,51 (9)		
	Стабилен	0,27 (2)		
		,22(9)		
	37,24 (12) с			0,439(33);
	3,38 (2) мин		**l i S**	0,472(100); 0.88(8)'
	0,602 (8) с		7,3	0,090; О,?-"
	0,446 (3) с		11,4	1,63
		Р+а (20)	2,14/100/; 2,49/5/; 4,44/21/	
21	22,48(3) с		2,52	0,350(2,3); 0,511(200, ан.)
22	2,602(2) года	(90,6)	1,820(0,05); 0,545	} 0,511 (180, ан.); 1,275(100)
		э. З. (9,4)		
23	Стабилен	**100**		
24	15,020 (7) ч		4,17(0,003); 1,389(100)	1,369(100); 2,754(100)
24/п	**0,02018(10)**			} 0,4723
25	59.6(7) с		3,83	0,39 (14); 0,58(14); 0,98(15); **1,61 (6)**
26	1,072 (9) с		6,7	1,82(100)
27	0,304 (7) с	**3-π (0,08)**	**8,0**	0,985; 1,698
28	0,0305 (4) с	**Г« (0,6)**	13,9	1,47; 2,39
21	0,122 (3) с		1,77; 1,94	
22	3,857 (9) с		3.2	0,58; 0,74
23	11,317(11) с		3.03	0,44(9); 0,511 (200, ан.)
24		78,99 (:		
25		10,00 (1		
		11,01		
	9,462(11) мин	Г	1,75	0,18 (0,7); 0,84(70); 1,013(30)
	21,07(10) ч		0,9; 0,46	0,031 (96); 0,40 (30); 0,95(30): 1,35 (70)
		г		
	1,38 (13) с			
	0,47(3) с	г		
24	2,066(10) с	в+'(Ш)	8,5	0,511 (200, вн.)
24/п	0,130 (4) с			
		и. п.		0,439
25	7,183(12) с		3,24	0,511 (200, ан.)
26	7,2(3) 10S лет		1,17	0,511 (170, ан.); ***1,*** 12(4)1 **1,81 (100)**
		г (85)		
		э. 3. (15)		
26/п	6,345 (3) с		3,21"	0,511 (200, ан.)
27	Стабилен			
28	2,259(9) мин		2,85	1,78(100)
29	6,56 (6) мин		2,40	1,28(94); 2,43(6?
30	3,60 (6) с		6,3; 5,0	2,23 (61); 3,51(39)
31	0,644 (25) с		7,9; 5,6	1,70; 2,32
25	0,220 (3) с			
26	2,210(21) с		3,83	0,511 (200,ан.);, 0,82f34)3 1,62
27	4,17(1) с		3,85	0,511 (200, ан.)

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
	157,3(3) мин		I,48	1,26(0,07)
	330(40) лет		**0,21**	
	0,2703(5) с		II,0	0,511 (200, ан.), 1,78(75);
	4,142(15) с		1,43; 2,10 3,95	4,44(10); 7,6(5) 0,511 (200, ан.); 1,28(0,8); 2,43(0,2)
	2,498 (4) мин		3,24	0,511 (200, ан.); 2,23(0,5)
	Стабилен			
	14,36 (4) сут		1,710	
	25,34 (12) гут		0,248	
	12,40 (12) с		5,4	2,13(25); 4,0(0,2)
	47,3(7) с		2,3	
	0,187(4) с			
	1,24 (4) с		5,09(20); 4,42 (80)	0,511 (200, ан.); 0,687(80)
	2,584 (18) с		4,42	0,511 (200, ан.); 1,27(1,1)
	Стабилен			
	87,24(17) сут		0,167	
	Стабилен	0,02(1)		
	5,06(1) мин		4,7	
	170,3(7) мин		3	
	0,298(2) с		11,7; 9,9;	0,511 (200, ан.); 2,24(70); 4,29(7); 4,77(14)
		;(0,01)	**2,20**	
	2,50 (2) с		4,55	0,511 (200, ан.); 2,9(0,3)
	1,529 (4) с		4,46	0,511 (200, ан.)
	Стабилен			
	3,01 (2)-10® лет		0,714	0,511 (0,003, ан.)
37	Стабилен			
38	37,24 (5) мин			1,60(38); 2,17(47)
38т	0,716(3) с			0,671 (100)
	55,6(2) мин		3,45(7); 2,18(8); 1,91	0,246(44); 1,27(50); 1,52(42)
	1,35(2) мин		7,5	1,46/100/; 2,83/100/; 3,10; 5,1
	0,18 с	3+р (34)		**0,81**
	0,841 (10) с		5,0	0,67; 3,13
	1,781 (9) с		4,94	0,511 (200, ан.) 1,22(5);
	Стабилен	(3)		
	34.8 (2) сут			
	Стабилен			
	269 (3) лет		0,565	
40	Стабилен			
41	109,6 (4) мин		2,49(0,8); 1,198	1,293 (99)
42	32.9 (И) года		-0,6	
43	5,37(6) мин			0,74; 0,98: 1,44
44	II,87 (5) мин			0,18; 1,70; 1,89
45	21,48(15) с		5,8; 3,2	1,02; 3,71
46	8(1)0			1,94
36	0,340 (3) с		9,9	1,97; 2,21 2,43
37	1,23(2) с		5,14	0,511 (200, аи.); 2,79(2)
38	7,636 (18) мин			0,511 (200, аи.); 2,17(100)
38т	0,929(3) с		5,0	0,511 (200, ан.)
39	Стабилен	,2581 (30)		

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
	1,277 (8). 10" лет	0,0117 (1)		
		р- (89)	1,314	
		(0,0Ш)	0,483	
	Стабилен	**6,7302 (30)**		
	12,360(3) ч		3,52	0,31 (0,2); 1,524 (18)
	22,3(1) ч		1,82 (1); 1,2(3); 0,83	0,373(85); 0,39*(18); 0,59(13): 0,619(81)
	22,13(19) мин		5.2	1,156(61); 1,74 (8); 2,1**(37); 2,6(7)
	17,3(6) мин			0,17; 1,71
	107 (10) с		4,2: 2,3	1,35; 3,70
	17,5 (3) с			2,0(84); 2,6(15)
	6,9(2) с		6;i(i); 4,1	
37	0,175 (3) с		3,10	
38	0,447 (10) с		5,6	1,57
39	0,876 с		5,49	0,511 (ан.)
40	Стабилен	96,941 (13)		
41	1,4 (2)-10® лет	**э. 3.**		
42		0,647 (3)		
43	Стабилен	0,135 (3)		
44		2,086 (5)		
45	163,8(18) сут	Р-	0,252	
46	Стабилен			
47	4,536(2) сут	0^004 (3)	1,98(18); 0,67	0,49 (5); 0,815 (5); 1,308 (74)
48	> 2 . 1 0 " лет			
49	8,716(11) мин	0,187(3)	1,95	3,10(89); 4,1 (10)
50	13,9(6) с		3,1	0,072; 0,257; 1,52: 1,59
		Р		
40	0,1823 (7) с	Г, *ГР*	9,1	0,511 (200, ан.); 3,75
41	0,601 (12) с		5,47	
42	О ,6839 (9) с	э. 3.		0,511 (200, аи.)
42т	61,3(7) с			0,438(100); 0,511 (200, аи.); 1,22(100); 1,52(
43	3,891 (12) ч		**1,20**	0,375(22); 0,511 (IS **i.)**
43от	0,632 (8) с	и. п.		
44	3,927 (8) ч		1,47	
		з. 3. (5)		0,511 (188, ан.); 1,159 (100)
	58,6(1) ч	(1,39)		0,271 (86); 1,02(1,3)
		и. п. (98,61)		
45	Стабилен	100		0,0124
45/п	**0,316 (9) с**		1.48(0,004); 0,357	0,889(100); 1,120(100)
46	**83,83 (2) сут**			0,142
46т	**18,70 (5) с**		**0,600**	0,160(73)
47	**3,35 (2) сут**		0,65	0,175(6); 0,983(100); 1,040(100); 1,814(100)
48	**43,7 (1) ч**			1,76 (0,03)
49	**57,4 (1) мин**		**2,01**	0,520(100); 1,12(100); 1,55(100)
50	**1,708 (9) мин**		**4,2; 3,e**	0,257
50/п	**0,35 (1) с**	и. п.		1,44; 1,57; 2,14
51	**12,4 (1) с**	Р-		
	0.088 (1) с	Р^Р	2,3/8/; 3,05/17/; 3,68/16/; 4,12/4/; 4,64/50/; 5,30/5/	
	0,199 (6) с		6,0; 5,4	**0,611**
	0,490(20) с		5,8	
	47,3 (12) года	**Э. 3.**		0,068(90); 0,078(98)
	184,8 (5) мин	р^	1,04	0,718(0,4); 1,408(0,3)

Продолокение табл. 36.5

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
	Стабилен			
	5,76 (1) мин			0,320 (9 р 0,605(1,5); 0,928
	1,7 (1) мин			
	32,7 (9) с		4.8; 3,1	0,101; 0,128; 0,228; 1,676
45	0,539 (18) с			
46	0,4223 (2) с		6,03	0,511 (200, ан.)
46/П	0,001 (1)с			**0,801**
47	32,6 (3) мин			1,80 (0,5)
	15,97 (4) сут			0,511 (100, ан.); 0,945(10); 0,983(100); 1,312(97)
	330 (15) сут			
	> 4-101" лет			0,783 (30); 1,55(70)
	Стабилен			
	3,75 (1) мин		2,47	1,434(100)
	1,61 (4) мин		2,50	1,006; 1,289
	49.8 (5) с		3,3	0,84 (100); 0,99(100)! 2,21 (100)
45	0,050 (5) С			
46	0,26 (6) с			
47	0,460 (15) с			
48	22,96 (3) ч			0,116(98); 0,31 (9с
49	42.09 (15) мин		1,54	0,063(14); 0,091 (2 0,153(13)
50	Стабилен			
51	27,704 (4) сут			0,320(10)
52				
53	Стабилен			
54				
55	3,55 (3) мин		2,59	
56	5,94 (10) мин		1.5	0,026; 0,083
50	0,2832 (6) с		**6,61**	
50т	1,75 (3) мин			0,227
51	46.2 (1) мин		2,17	
52	5,591 (3) сут			0,511 (67, ан.); 0,744 (82);
			0,575	0,935(84); 1,434(100)
	21,1 (2) мин		1,63	0,511 (193, ан.); 1,434(100) 0,378
	3,7 (4)-10" лет			
	312,5 (5) сут			0,835(100)
	Стабилен			
	2,5785 (6) ч		2,85	0,847 (99); 1,811); 2,110(15)
	1,61 (5) мин		2,55	0,W4; 0,122; 0,(
	65.3 (7) с			
	4.6 (1) с		4,8; 4,4	0,473; 0,571; 0,726
	1,79 (10) с			
	0,075 (10) с			
	0,270 (6) с			
	8,275 (8) ч	(56)		0,165(100); 0,511 (112, **ан.)**
		з. 3. (44)		
52т	46 (2) с	**Э. 3.,** и. **п.**		
53	8,51 (2) мин		3,0	0,38(32); 0,511 (196, ан.)
53т	2,58 (6) мин	и. п.		3,041
54	Стабилен	5,8(1)		
55	2.7 года			

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного $, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
		91,72 (30)		
	Стабилен			
	44,496 (7) сут		1,57(0,3); 0,475	0,192(2,8); 1,095(56); 1,292(44)
	-3-Ю® лет		**0,1**	
	5,98 (6) мин		**2,8**	0,13У11/; 0,30/48/; 1,03/98/; 1,20/100/
	68 (2) с		2,5	0,506
54	0,19323 (14) с	Э. з.		
54т	1,48 (2) мин			0,198
55	17,54 (4) ч		1,50"	0,480(12); 0,511 (160, ан.); 0,930(80); 1,41 (13)
	78,76 (12) сут	Э. з. (! **(20)**	1,49	0,511 (40, ан.); 0,847(100); 1,04(15); 1,24 (66); 1,77(15); 2,02(11); 2,60 (17); 3,26(13)
57	270,9 (6) сут	Э. з.		0,014(10); 0,122(86); 0,136(11)
58	70,78 (10) сут	з. з. (85)		0,511 (30, ан.); 0,810(99);
			0,474	0,865(1,4)
58т	9,15 (10) ч	и. п.		0,0249
59	Стабилен	100		
60	5,271 (1) года		1,48 (0,12)5	1.173(100); 1,332(100)
			0,314(99)	
	10,47 (4) мин	и. п. (>99)		0,059 (2,1); 1,33 (0,25)
		Г (0,25)	1,55	
61	1,650 (5) ч		**1,22**	0,067(89)
62	1,50 (4) мин			
62т	13,91 (5) мин			1,17** (180); 1,47(20); 1,74(19);
63	27,4 (5) с			О',087,^0,982
64	0,30 (3) с			0,931; 1,346
	6,10 (2) сут			0,163(99); 0,276(31);
				0J48(48); 0,812 (85) 1,56(14)
	36,08 (9) ч	э. з. (54)		0,127(14); 0,511 (92, ан.);
		(46)	0,85	1,37 (86); 1,
	Стабилен	**68,27** (1)		
	7,5 (13). 10* лет	**э. з.**		
		26,10(1)		
	Стабилен	**1,13 (1)**		
		3,59 (1)		
	100,1(20) года		0,067	
	Стабилен	**0,91 (1)**		
	2,520 (2) ч		**2,1Г**	1,115(16); 1,481 (25)
	54,6 (4) ч		**0,20**	
	21 (1) с		4,1	0,90* (51); 1,26(15)
	3,204 (7) с		7,5	1,45
	81,5 (5) с		3,7	0,511(197, ан.); 0,879(9); 1,305(11)
	23,2 (3) мин	(93)	3,92(6): 3,00(18);	0,511 (186, ан.); 0,85(15);
			2.00	1,332 (80); 1,76(52)
		э. з. **(7)**		0,067(4); 0,284(12); 0,38(3);
	3,408 (10) ч	**(60)**	1,2^	0,511 (120, ан.); 1,19(5)
		Э. з. (40)	2,91	0,511(195, ан.); 0,88(0,3)
	9,74(2) мин			
	Стабилен	**69,17 (2)**		
	12,701 (2) Ч	э. з. (43)	0,573	0,511(38, ан.); 1,34(0,5)
		Р (Ш)	0,656	
	Стабилен	**30,83 (2)**		

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная ь. %) групп частиц	•^-излучения
	5,10 (2) мин		2,63	1,039 (9)
	61,92 (9) ч		0,57	0,092* (23); 0,184 (40)
	31 (1) с		3,5	0,80(17); 1,078(95)
	3,75 (5) мин	и. п. (86)		
	3,0 (1) мин		2,5	0,531; 0,834; 1,007
	4,5 (10) с			
	0,040 (10) с	**Гр**	1,92; 2,53; 4,57	
	0,1837 (23) с	э. з.		0,491; 0,914
	2,38 (5) мин		3,1;,2,5	0,061; 0,273; 0,334; 0,670
	89,1 (2) с		4,4	0,48(11); 0,511 (198, ан.); 0,98(3); 1,64(6)
	9,26 (2) ч	э. з. (82)		0,042 (20); 0,51** (47);
		Г (18)	**0,66**	0,59 (22)
	38,1 (3) мин	(93)	2,34	0,511 (186, ан.); 0,669(8);
		э. з. (7)		
	Стабилен	**48,6 (3)**		
	244,1 (2) сут	з. з. (98,3)		} 0,511 (3,4, ан.); 1,115(49)
		27,9 (2)	0,327	
	Стабилен	4,1 (1)		
		18,8 (4)		
	55,6 (16) мин	Р-	0,90	
	13,76 (2) ч	и. п. (>99),		0,439(95)
		р- (0,033)		
	Стабилен	**0,6(1)**		
	2,4S (10) мин		**2,61**	0,39(1,3); 0,510(13); 0,92(3); 1,12(153)
	3,94 (5) ч		1,46	0,13(9); 0,385(94); 0,495(75); 0,609(95); 0,76(5); 0,99(8)
	46,5 (1) ч		0,30	0,015 (8); 0,145 (90); 0,192(10);
	23,5 (10) с		4,7	0,216; 0,496; 0,911
	95 (1) с		2,3; 2,1	0,057; 0,14; 0.19
	10,2 (3) с		5.6	
	5,7 (3) с		3.7	0,08—1,03
	1,4 (3) с		4.8	0,189; 0,473
	1,47 (15) с		5,1	0,182; 0,225; 0,454; 0,636; **0,860**
	2,63 (9) с			
	0,1161 (3) с			
	32,4 (5) с			
	2,630 (11) мин		6,05(33); 2,8	0,511 (196, ан); 0,80(15); 0,992 (43); 1,5 !(14); 2,18(11); 3,32(18)
	15,2 (2) мин	О 50)	2,24 (12); 2,11	\ 0,061 (12); 0,115 (55); 0,152 (10);
		э. з. (<50)		/ 0,511 (180, ан.); 0,75(10)
	9,49 (8) ч	(57)	4,153	1 0,511 (114, ан.); 1,039(37);
		э. з. (43)		/ 2,183 (5); 2,748(25); 4,30(5)
	3,261 (1) сут			0,388 (7)
	68,1 (3) мин			
		э. з. (12)		I 0,511 (176, ан.); 1,078(3,5)
	Стабилен	**60,1 (2)**		
70	21,15 (5) мин	Р- (99,8)	1,65	0,173(0,16); 1,040(0,5)
71	Стабилен	39,9 (2)		
72	14,10 (2) ч		3,15	0,630 (27); 0,835 (96); 2,201 (26); 2,50* (20)
73	4,87(3)4		1,19	0,054(9); 0,295(94); 0,74(6);
74	8,1 (1) мин		2,5	0,60* (100); 0,87* (9); 2,35 (45)
74т	9,5 (10) с			0,0597
75	2,10 (3) мин			0,58(3)
76	27,1 (2) с			0,546; 0,563; 1,108

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
			групп частиц	Т-излучения
	13,2 (2) с		5,2	0,459; 0,469
	5,09 (5) с		7,5; 5,1	0,567; 0,619; 1,
	3,00 (9) с			0,09—2,51
	1,66 (2) с	3-,		
	0,040 (15) с			
	63,7 (25) с		3,3; 3,0	0,128; 0,427; 0,667
	30,9 (7) с		5,2; 4,6	0,511 (197, ан.); 0,67(3); 1,72 (2)
	2,26 (5) ч	**(62)**		, 0,046(37); 0,114(22); 0,185(23); 0,27(19); 0,34(19);
			1,1; 0,7	0,38 (48); 0,47(19);
	18.7 (5) мин			) 0,511 (124, ан.) 0,^70* (105); 0,511 (170, ан.);
	287 (6) сут		3,2; 3,0	
	39,05 (10) ч	э. 3. (675 (33)		\ 0,511 (68, ан.); 0,573(13); / 0,872(10); 1,107 (28)
70	Стабилен	20,5 (5)	1,22	
71	11.8 (4) сут			
71т	0,0202(5) с			
72	Стабилен	27.4 (6)		
73	0,499 (11) с	7,8 (2) и. п.		**0.0666**
73т	Стабилен			
74	82,78 (4) мин	36.5 (7) г	1,19	0,199(1,4); 0,265(11)
75	47,7 (7) с	и. п. (99,97), Г (0,03)		0,1397
75т				
76	Стабилен	7,8 (2)		
77	11,30(1)4	г	**2,2**	0,21* (61); 0,263(45); 0,368(15); 0,417(25); 0,563(18); 0,73** (14)
	52,9 (6) с	р- (76)	2,9	0,159 (12); 0,215 (21)
		и. п. (24)	0,71	0,277 (94); 0,294
78	88 (1) мин		4,1	0,109^
79	19,1 (3) с			0,186
79т	39.0 (10) с		2,4	0,266; 0,937; 1,564
	29,5 (4) с		~5,6;	0,336; 0,737; 0,793
	10.1 с			1,093
	4,6 (4) с			
	1,9 (4) с			
	0,0958 (^4) с	Э. 3.		
	42.5 (12) с		4,7	0,121; 0,123; 0,244
	2,527 (13) мин	Э. 3.		0,651; 0,752; 1,016; 1,778
	15.2 (2) мин			0,23; 0,511 (ан.)
	52.6 (3) мин		(6); 2,14	0,511 (183, ан.); 0,60(23); 0,67(25); 0,75(23); 1,04(78); 1,12(23); 1,71(22)
	64.8 (7) ч	э. 3. (70) Г (30)		} 0,175(90); 0,511 (60, ан.)
			0,81	0,511 (150, ан.); 0,630(8);
	26,0 (1) ч		3,34 (17); 2,50	0,835(78)
	80,30 (6) сут			0,054 (9)
	17,78 (3) сут	**Й** (39)	1,36 1,54 (3); 0,95 (26)	0,511 (59, ан.) 0,596(61); 0,635(14)
74т	8.0 с	и. п.		0,283
75	Стабилен	**100**		
76	26,32 (7) ч		2,97	0,559(43); 0,657(6); 1,22* (5)
77	38,83 (5) ч		**0,68**	0,239(2,5); 0,522(0,8)
78	90,7 (2) мин		4,1	0,614/42/; 0,70/15/; 0,83/8/; 1,31/11/
	9.01 (15) мин		2,15	0,36(2); 0,43(2); 0,89(1)

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)
	15.2 (2) с		0,66(42); 1,22(4); 1,64(4); 1.77(1,7)
	33 *(2)* с		0,468; 0,491
	21 с		0,655; 1,080; 1.731
	14.1 (11) с		0,735; 1,113
	5,5 (3) с	**(0,1)**	0,667; 1,455
	2,028 (12) с	Гп (23)	
	0,9 (2) с	3-п 4)	0,704
	0,75 (6) с		
	27.4 (2) с	э. З.; э. З. ***р*** (0,07)	0,098; 0,691
	41,0 (6) мин	Э. З.	
	4,74 (5) мин	э. З.	0,16; 0,511 (ан.)
	8,40 (8) сут	Э. З.	0,046 (59)
	7,15 (8) ч	(65)	0,066(65); 0,359(99);
		з. З. (35)	0,511 (130, ан.)
	39,8 (13) мин		0,0257
		и", п". ^73)	
	Стабилен	0,9 **(1)**	
	119,77 (1) сут		0,121 (17); 0,136(57);
		Э. З.	0,265(60); 0,280 (25); 0,401(12)
76			
77	Стабилен	9,0 (2)	
77т	17,45 (10) с		0,162(50)
78	Стабилен	и. п.	
79	~6,5.10«лет	**0,16**	
79т	3,91 (5) мин	и. п.	0,096 (9)
	Стабилен	49,7 (7)	
		1,58	0,Ж**(0,9): 0,56** (0,3)5
	18.5 мин		0.83(0,2)
		и. п. (>99)	0,103(8)
	57,25 мин	Г (0,058)	
	1,4.1020 лет	9,2(5)	
83	22.5 (2) мин	**1,8**	0,22(44); 0,36(69); 1,88(16); 2,29(9)
83т	70.4 (3) с		0,35/16/; 0,65/20/; 1,01**/100/; 2,02/40/
	3,2 (2) мин		0,407
	31,7 (9) с		0,345; 1,427; 3,396
	15.3 (9) с		2,441; 2,660
	5,55 (20) с	**,16)**	0,243; 0,334; 0,468; 0,573
	1,53 (6) с		0,159; 0,259; 1,904
	0,41 (4) с	.5)	
	0,27 (5) с	**(- 2 1)**	
72	78.6 (24) с		
73	3,4 (3) мин		
74	25,3 (3) мин	4,7	0,511 (ан.); 0,64
74т	41.5 (15) мин		0,195
75	97 (2) мин	(90) 1,70*	I 0,285; 0,511 (ан.); 0,62
		э. З. 10)	
76	16.2 (2) ч	**(~ 62)**	\ 0,511 (133, ан.); 0,559(63);
		э. З. (~ 38)	/ 0,65 (19); 1,21 (13); 1,86(11)
77	57,036 (6) ч	э. З (99)	} 0,24**(30); 0,52(24); 0,58(7)
		0,34	0,106
77т	4,28 (10) мин	Г п^	
78	6,46 (4) мин	2,55	
		?-(<0,01)	
		з. З. (>99)	} 0,511 (184, ан.); 0,614(14)
79	Стабилен	50,69 (5)	
79т	4,864 (30) с	и. п.	
	17,68 (2) мин	р- (92) **2,00**	0,207
		2,6) 0.87	0,511 (5, ан.); 0,618 (7);
		э. S. (5,7)	**0,666 (1)**

Продолжение табл. 37.1

		Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) групп частиц	
	80т	4,42 (1) ч			
	81	Стабилен			
	82	35,30 (2) ч			0,554(66); 0,619 (41);
					0,777 (83); 1,044(29)
		6,13 (8) мин	и. п. (97,е		0,046(0,3); 0,777(0,15)
			Г (2,4)	3.1	
		2,39 (2) ч			0,530(1,4)
		31,80 (8) мин		4^68	0,88(51); 1,90(18 3,93 (13)
	84т	6.0 (2) мин		2.2	0,424; 0,882; 1,4е
	85	172 (2) с		2.5	0,802; 0,925
	86	55,0 (8) с		7,1	1,36/39/; 1,56/100/; 2,75/36/
		55.69 (13) с		2.6	1,44/100/; 1,85/18/; 2,48/18/; 2,98/25/; 4,19/21/
		16.3 (3) с			0,76
		4,53 (10) с			0,775; 1,098
	90	1,71 (14) с			0,707; 1,362
	91	0,541 (5) с			0,263; 0,803
	92	0,365(7) с			0,740
36Кг	72	17,2 (3) с		3,8	0,163; 0,310; 0,415; 0,577
	73	27,0 (12) с	N Г Р (0,7)		0,178; 0,241; 0,455
	74	11,50 (11) мин		**2,2; 2,0**	0,511 (ан.)
	75	4,3 (1) мин		3,2	0,133; 0,155
	76	14,8 (1) ч			0,045; 0,270; 0,316; 0,407
	77	74.4 (6) мин			I 0,130; 0,147
	78	Стабилен			
	79	35,04 (10) ч			0,398 (10); 0,511 (15, ан);
				0,60	**0,606(10)**
	79т	50 (3) с			0,130
	80	Стабилен			
	81	2.1 (2)-10® лет			0,276
	81/и	13 с			0,190(65)
		I Стабилен			
	83т	1,83 (2) ч			0,009; 0,042
	84	Стабилен			
		10,72 (2) года		0,67	0,514(0,4)
		4,480 (8) ч	Г (79)	**0,82**	0,150(74); 0,305 (13)
			и. п. (:		
		Стабилен	**17,3 (2)**		
					0,403(84); 0,85(16); 2,57(35)
					0,191 (35); 0.85(23); 1,55(14); 2,40(35)
		3,07 (9) мин			0,23/85/; 0,51/42/; 0,60/100/; 0,88/65/; 1,12/45/; 1,51/88/
		32,32 (9) с		4,4; 2,6	0,120(65): 0,536(48); 1,11(48)
		8,57 (4) с		6,4; 3,6	0,109; 0,507; 0,613; 1,109
		1,85 (1) с			0,142; 0,548; 0,813; 1,219
		1,289 (12) с			0,253; 0,267; 0,324; 2,350
		0,20 (1) с			0,220; 0,359; 0,629
		0,78 (3) с			
		< 0 , 1 с			
		17,2 (8) с			0,179
		36,8 (15) с		5,2	0,354; 0,423; 2,573
		3,70 (15) мин			0,067; 0,179; 0,394
		17,66 (8) мин			0,455; 0,693; 3,438
		22,9(5) мин			0,15(73); 0,19(29);
				4,7	0,511 (180, ан.)
		4,58 (1)'			0,511 (195, ан.); 0,618 (39)
				1,03	0,446

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) групп частиц	
81m	32 мин	и. п.	1,4	0,085
82	1,25 (3) мин	(96) э. з. (4)	3,15	0,511 (192, ан.); 0,777 (9)
	6,2 (5) ч	э. з. (94) Г (6)	0,78	0,554 (66); 0,619 (41); 0,777 (83)
	86,2 (1) сут			0,53** (93); 0,79 (0,9)
	32,87 (11) сут	э! Г. (76) Р Я)"	**1,66** 0,91	0,511 (42, ан.); 0,88(74)
84m	20,49 (17) мин			0,216 (37); 0,250 (65); 0,464 (32)
	Стабилен			
	18,66 (2) сут	**э. з.** (0,005)	1,78	1,078 (8,8)
86m	1,017 (3) мин	и. п.		0,556
87	4,80(13) Х	27,835 (13)		
	Х 1010 лет		0,274	
	17,8 1) мин		5,3	0,898(13); 1,863(21)
	15,2 1) мин		3,92 (7); 2,9(5); 1,6	0,66(17); 1,05(75); 1,26(54)
	153 (3) с		**6,6**	0,83* (61); 3,34** (15); 4,13 (11); 4,34* (18)
	258 (5) с			0,107
	58.4 (4) с			0,094; 0,346; 2,564; 3,6
	4,50 (2) с	β⁻n (0,012)		0,570; 0,815; 2,821
	5,8 (1) с	β⁻n (1,3)		0,213; 0,433 0,986; 1,385
	2,69 (4) с	β⁻n (10)		0,837; 1,09; 1,309; 1,578
	0,384 (6) с	β⁻n (8,4)		0,204; 0,329; 0,352; 0,681
	0,199(3) с	β⁻n (13)		0,815; 1,037
	0,176 (6) с			0,167; 0,585; 0,599
	0,114 (5) с	*I-,%-n* ^03)		0,144; 2,172
	0,076 (5) с			0,091; 0,145
	~ 30,6 мин			
	2,25 (10) мин	Э. З.		
	106,3 (15) мин	Э. З.		0,58
	25.5 мин	Э. З.		0,15; 0,19; 0,44
	25.0 (4) сут			
	32,4 (2) ч	з." Г. (84) Г (16)	1,15	0,040(24); 0,38(35); 0,511 (32, ан.); 0,76(40)
	Стабилен	0,56 (1)		
	64,84 (2) сут			0,514 (100)
	67,66 (7) мин			0,150(14); 0,239 (85)
87	Стабилен			
87m	2,81 (1) ч	и. п. (>9S э. З. (0,3)		0.388(80)
	Стабилен	82,58 **(1)**		
	50,55 (9) сут		1,463	0,91 (0,01)
	28.6 (3) лет		0,546	
	9,52 (6) ч	3-	2,67	0,645(15); 0,748(27); 1,025(30)
	2,71 (1) ч		1,5 (10); **0,55**	0,44 (3); 1,37 (90)
	7,6 (2) мин		2,9	0,60; 0,8; 1,2
	78 (2) с		3,5; 2,1	1,42 (100)
	25.1 (2) с		**6,1**	0,686; 2,247; 2,717; 2,933
	1,06 (4) с		4,4	0,122; 0,809; 0,932
	0,40 с		7,4; 5,2	0,307; 0,652: 0,954; 1,905
	0,65 (3) с		5,7	0,037; 0,119; 0,429; 0,445
	5 мин			
	~ 10 мин			
	7,06 (8) мин			

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного группы частиц	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
	40 (1) мин		3,5 2,24	0,795(100); 0,982(100); 1,041 (50)
	2,68 (5) ч	*I.* з ! %) г (55)	1,54	} 0,231 (13); 0,511 (140, ан.)
	4,86 (13) ч	э. 3. (45)		} 0,51** (200); 0,92(9)
	14,74 (2) ч	з. 3. (74) **(26)**	3,15; 2,34	\ 0,51* (35); 0,63* (37); I 1,077(82); 1,16*(35); 1,925(24)
	48 (1) мин	и. п. (99,31) (0,69)		I 0,218(94)
	80,3 (3) ч	з. 3. О 99) Г (0,3)		\ 0,483
	12,9 (4) ч	и. п. (~98) **э. 3. (~2)**		} 0,381 (74)
	106,60 (4) сут	з. 3. (>99)	0,76	0,{ 1,836 (100); 2,734 (1)
	Стабилен			
	16,06 (4) с	и. п.		0,909 (99)
90	64,1 (1) ч	р-	2,27~	
90m	3,19 (1) ч	и. п. (>99) **Г (0,0021)**		0,202 (97); 0,482 (91)
	58,51 (6) сут	Р-	1,545	1,21 (0,3) 0,555
91m	49,71 (4) мин	и. п.	3,63	0,934 (14); 1,40 (4,7)
92	3,54 (1) ч	г	2,89	2,267(6); 0,94(2,3); 1,90(1,8)
	10,1 (2) ч		5,0	0,56(6); 0,92(43); 1,13(5)
	19,1 (4) мин		4,4	0,954; 1,324; 2,176; 2,633; 3,577
	10.3 (2) мин			
	2,3 (1) мин		**6,0; 5,1**	
	1,11 (14) с			1,22. 1,59; 2,94; 4,45
	0,64 (3) с			0,122; 0,724
	1,5(1) с	**(1)**		
	0,27 (7) с			
	10 мин			
.oZr	5,05(5) мин			
	7,86 (4) мин	з. 3.		
85m	10,9 (3) с	и. п.		0,292
86	16,5 (1) ч	Э. 3.		0,028(20); 0,243(96); 0,612(5)
	104,0 (5) мин		**2,10**	0,511 (ан.); 1,2; 2,2
	14,0 (2) с	и. п.		0,336; 0,201; 0,135
	83.4 (3) сут	Э. 3.		0,394 (97)
	78,43 (8) ч			I 0,511 (44, ан.); 0,91(99)
	4,18 (1) мин	Λ	0,90	
		(1.3)		0,588(87); 1,51(6)
		Б1,45 (2)	2,40 (0,2); 0,89 (1,2)	
	Стабилен	11,22 (2)		
		17,15 (1)		
	1,53 (10) X			
	X 10» лет			
	Стабилен	17,38(2)		
	64,02 (4) сут		0,89(2); 0,с	0,724 (49); 0,756(49)
	>3,56-10" лет	**1,80 (1)**		
	17,0 (2) ч		1,91	0,747 (92); 1,148
	30,7 (4) с		2,3	
	2,1 (1) с		3,5	0,47; 0,55; 0,59
	2,9 (2) с			0,535; 0,600

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (групп частиц	ность, %)
	12 (3) с			
	80 (12) с			
	2,60 (7) мин			0,201; 0,471
	14,3 (3) мин			0,503; 0,671; 1,06; 1,08
	122 (4) мин		2,9	0,511 (ан.); 1,626; 3,577; 3,838
90	14,60 (5) ч		1,50	0,142 (75); 1,14(97); 2,32(82)
91	~ 1·10⁴ лет			
91т	62 сут	и", п. (97)		} 0,104 (0,5); 1,21 (3)
92	3,5 (3)·10⁷ лет			0,561; 0,934
92т	10,15 (2) сут	э. 3.' (>99)		} 0,934 (99)
		Г (0,06)		
93		100		
93т	13,6 3) года			0,030
94	2,03 16) X		0,49	0,702(100); 0,871 (100)
	X 10« лет			
94т	6,26 (1) мин	и. п. (>99)		
		Г (0,5)		} 0,041; 0,871
95	34,97 (3) сут	Р-	0,160	0,765 (105)
95т	86,6 (8) ч	и. п. (97,5)		
		Г (2,5)		
96	23,35 (5) ч	Р-		)(28); 0,569(59);
				!(97); 1,092 (49)
97	72.1 (7) мин		1,27	> (98)
97т	60 (1) с			1 (98)
98	2,86 (6) с		4,6	; 1,024
	51,3 (4) мин			I (75); 0,787 (100) 1,16(30)
	14,3 с			i 0,138
99т	2,6 (2) мин			1/1/; 0,260 /1/
101	7.1 (3) с			I; 0,276; 0,441; 0,480
103	1,5 (2) с			!: 0,641
105	1,8 (8) с			
	8.2 (5) мин			0,511 (ан.); 2,69
	5,67 (5) ч	Г (25)		0,122 (71); 0,257(85);
		Э.З. (75)		0,511(50, ан.)
91	15,49(1) мин		3,44	0,511 (ан.)
91/л	65.2 (8) с	и. п. (~57)		
		(-43)	3,99/15/; 2,78/100/	} 0,658(54); 1,21(22); 1,53(15)
	Стабилен	14,84 (4)		
	3,5 (7)-103 лет	з. З.		
	6,85 (7) ч	и. п. (99,88);		0,264 (58); 0,685(100);
		э. 3. (0,12)		1,479(100)
		9,25 (2)		
		15,92 (4)		
		16,68 (4)		
		9,55 (2)		
		24,13 (6)		
	66.02 (1) ч		1,23	0,181 (7); 0,740(12); 0,780(4)
100	Стабилен	9,63 (2)		
101	14,6(1) мин		2,23	0,191 (25); 0,59(21); 1,02(25)
102	11.3 (2) мин		1,2	0,148; 0,212; 0,224
103	67,5 (15) с			0,424
104	1,3(3) мин		4,8	0,070
105	36,7(10) с			0,077; 0,085; 0,148
106	8,4(5) с			0,054; 0,466; 0,619
	1,5 (4) с			0,26
	3,14(2) мин	Г		
	4,4(3) мин	92)		0,14 (67); 0,33(90);
		э. З. 8)		0,511 (184, ан.);
				0,79(95); 1,54(100)

		период полураспада	сительная распростра-ненность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
	93	2,75(5) Ч	**э. з.** (87) (13)	**0,80**	\ 0,511 (26, .); 1,35(65); I 1,49(33)
	93m	43,5 (10) мин	и. п. (80) э. З. (20)		0,390(63); 2,66(18)
	94	293 (1) мин	Г (И) э. З. (89)	0,816	0,511 (22, ан.); 0,702(100); 0,849(100); 0,871 (100)
	94m	52(1) мин	Г (66) з. **з.** (34)	2,47	0,511 (132, ан.); 0,871 (91); 1,53(10); 1,87(9)
	95	20,0(1) ч			0,768(82); 0,84(11)
	95m	61 (2) сут	(6,42? и. п. (4)		0,204(70); 0,584(36); 0,838(27)
	96	4,28(7) сут	Э. З.		0,778(100); 0,81 (84);
	96m	51,5(10) мин	з. З. (2) и. п. (98)		0,851 (100); 1,12(16) } 0,034; 0,778; 1,200
	97	2.6 (4). 108 лет	з. З.		
	97m	91 сут	и. п.		
		4,2(3)-106 лет		4,0	0,66(100); 0,76(100)
		2,13 (5)-10® лет		0,292	
		6,02(3) ч	10-)		0,1426(90)
	100	15,8(1) с		3,38	0,540; 0,60
	101	14,2(1) мин		1,32	0,307(91); 0.545(8)
	102	5,28 (15) с		4,2	0,475
	102m	4,35(7) мин	Г (-98) и. п. (~2)	**2,0**	} 0,47; 0,63 0,135/17/; 0,21/10/
	103	54,2(8) с		2,2~	0,36; 0,53; 0,88; 0,89
	104	18,2 (5) мин		4,6	0,108; 0,143; 0,159; 0,321
	105	7.7 (2) мин		3,4	0,270; 1,97; 2,24; 2,79
	106	36(1) с			**0,10; 0,18**
	107	21,2 2) с			
	108	5,17 7) с			0,24; 0.47; 0.71; 0.73; 1,58
	109	1.4(4) с			
	no	0,83(4) с			0,241
«4RU	92	3,65(5) мин			0,135; 0,214; 0,259
	94	51,8 (6) мин	э. З.		0,367; 0,891
	95	1,64 (1) ч	э. З. (85)		\ 0,340(70); 0,511 (30, ан.);
				1,33	/ 0,625(13); 1,09(21)
	96	Стабилен			
	97	2,9 (1) сут	**Э. З.**		0,215(91); 0,324(8)
	98		1,88 (5)		
	99		12,7 (1)		
	100	Стабилен	12,6 (1)		
	101		17,0 (1)		
	102		ЗЬв(2)		
	103	39,35 (5) сут		0,70(3); 0,21	0,497(88); 0,610(6)
	104	Стабилен	18,7 (2)		
	105	4,44 (2) ч		1,87(11); 1,15	0,317*(11); 0,475*(20); 0,67*(16); 0,726(48)
	106	371,63 (17)cVT		0,039	
	107	3,75 (5) мин		3.2	0,195(14); 0,86(7)
	108	4,55(5) мин		1.3	0,165 (28)
	109	35(3) с			0,206; 0,226; 1,93
	110	14,6(10) с			0,096; 0,112
	111				
	112	4S714) C			
«Rh	95	5,02 (10) мин			
	95m	1,96 (4) мин	**э. З.** (12), **и. п.** (88)		0,543; 0,784
		9,90(10) мин			0,63; 0,68; 0,83
		1,51 (2) мин	(40), **и.** п. (60)		0,052; 1,10; 1,70

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) групп частиц	
	32 мин		2,1	0,422; 0,840; 0,879
	8,7(2) мин		3,5; 2,	0,65(100)
	3,5(3) мин			0,050; 0,745
	16 сут	э. з. (90)		I 0,511 (20, ан.); 0,62 (20)
99т	4,7 ч	Г (10)	0,74	0,065; 0,341; 0,618; 1,261
100	20.8(1) ч	з." 3.' (ЭЗ)		\ 0,511 (13, ан.); 0,540(88);
	3,3 (3) года	Г ?	**2,62**	**I** 0,820(25); 2,37(39)
	4,34 (1) сут	э! з! (92,8)		0,127 (88); 0,198 (75); 0,325 (in
102	~ 2,9 года	и. п. (7,2)		} 0,157; 0,307(83); 0,545(6)
102m	207(3) сут	э. 3.		0,475; 0,631; 0,697
		э. 3., и. п. (5)		\ 0,475 (57); 0,511 (25, ан.);
		I- (19)	1,29 1,25	I 0,628
103	Стабилен	**100**		
103m	56,12(1) мин			0,040 (0,4)
104	42,3(4) с			0,56(2); 1,24(0,13)
104m	4,34 (5) мин	и. п. (>'		\ 0,051 (47); 0,078 (2,5);
		Г (0,13)		/ 0,097(2,6); 0,129
105	35,36 (6) ч		0,568	0,306(5); 0,319 (19)
105m	45 с			0,129
106	29,80(8) с		3,54	0,512(21); 0,622*(11)
106m	130 (2) мин		1,7; 0,9	0,140; 0,512; 0,717; 1,046
107	21.7 (4) мин		1,20	0,305 (73); 0,390(11)
108	16.8 (5) с		4,5	0,434 (43); 0,51**(10); 0,62(22)
109			2,6; 2,3	0,11; 0,18; 0,29; 0,33; 0,43
110			5,5	0,374; 0,440; 0,797
112	0,8 (1) с			0,349
113	-0,91 с			0,129
114	1,68 (7) с			0,333
	17,7 (3) мин			0,112; 0,663; 0,838
99	21,4 (2) мин			0,136; 0,264; 0,673
100	3,63 (9) сут			0,074 (34); 0,084 (49); 0,126 (16)
101	8,47 (6) ч	Э. 3.		} 0,296(30); 0,590(24)
102	Стабилен	1,020'(12)	0,78	
103	16,96 (2) сут			0,297(0,011); 0,362 (0,06); 0,498 (0,011)
104		11,14 (8>		
105	Стабилен	22,33 (8)		
106		27,33 (5)		
107	6,5 (3) X X 100 лет		0,03	
107m	21.3 (5) с	и. п.		0,215
108	Стабилен	26,46 (9)		
109	13,46 (2) ч		1,028	I (5); 0,60 (0,03)
109m	4,69 (1) мин	и. п.		
110	Стабилен	11,72(9)		
111	23.4 (2) мин		**2,2**	0,38/5/; 0,60*/13/; 1,4*/8/
111m	5,5 (1) ч	I. п. (71)		0,172
		S- (29)		0,019 (20)
112	21,045 (40) ч			0,096; 0,222; 0,643; 0,739
113	93 (5) с			0,126; 0,136; 0,232; 0,358
114	2,4 (1) мин			0,089; 0,255; 0,343
115	41 (3) с			0,115; 0,178
116	12,72 (44) с			
117	5,0 (6) с			
	44.5 (12) с			0,571; 0,679; 0,863
99	1,8 мин			0,264; 0,806; 0,832
100	2,3 (1) мин			0,666; 1,694

	Период полураспада	Тип, распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэБ (относительная интенсивность, %)	
101	11.1 (3) мин		3,4; 2,7	0,261; 0,588; 0,667; 1,174
102	12,9 (3) мин		2.3	0,56; 0,72; 0,84; 1,74
102т	7,7 (5) мин	э. з. (51), и. п. (49)		0,009
103	65,7 (7) мин	з. з. (~70)	1,6	0,12*/26/; 0,15/23/; 0,27/34/: 0,511 /100, ан./
103т	5,7 (3) с	и. п.		0,134
104	69.2 (10) мин	г	0,99	0,556 (84); 0,764 (48); 0,854 (30)
		э. з.		
104/п	33,5 (20) мин	г	2,70	0,511 (120, ан.): 0,556(100)
		э. з.,и. п. (33)		0,280(32); 0,344** (42)
105	41,29 (7) сут	Э. з.		0,025
105т	7,23 мин	э. з. , и. п. (99,7)		0,511 (140, ан.)
106	24,0 (1) мин		1,96	0,512 (86); 0,616 (23);
106т	8,46 (10) сут	э. з.		0,717** (31);
				0,80**(41); 1,046(29)
107	Стабилен	51,839 (5)		
107т	44,3(2) с	и. п.		0,093 (5)
	2,37 (1) мин	(97,5)	1,64	0,434(0,45); 0,511 (0,56, ан.);
		э. з. (2,2)		0,632(1,7)
		S+ (0,28)	0,90	
	127 (21) лет	з. з. (91)		0,079, 0,434 (89); 0,614 (90);
		и. п. (9)		0,723 (90)
109	Стабилен	48,161 (5)		
ПО	24,6 (2) с	Р- (99,7)		0,658(4,5)
		э. з. (0,3)		
	249,76 (4) сут	Р- (98,5)	1,5 (0,6); 0,53(31); 0,087	0,658 (96); 0,764 (23); 0,885 (71); 0,937(32); 1,384 (21)
111	7,45 (1) сут		1,05	0,247(1); 0,342(6)
111m	64,8 (8) с	и. п. (99,7);		I 0,060 '
		Р- (0,3)	3,94	0,617(41); 1,40(5)
112	3,14(2)4		2,0	0,12/10/; 0,30/100/; 0,67/17/
И3	5,37 (5) ч		1,9, 1,5	0,043; 0,299; 0,316; 0,392
113m	68.7 (50) с		4,9	0,57
114	4.6 (2) с		3,2	0,14**(12); 0,22**(49);
115	20,0 (5) мин			0,28(13); 1.48(11); 2,12(13)
116	2,68 (1) мин		5,0	0,52; 0,70
116m	10.4 (8) с			0,081; 0,514; 0,706; 1,030
		(~ 2)		
117	72.8 (10) с			0,135; 0,338
118	3.7 с			0,488; 0,677
	2.8 (3) с	i- (59), и. п. (41)		0,128
119	2,1 (1) с	β−		0,366; 0,399; 0,626
120	1,17 (5) с	β−		0,506; 0,698
120m	0,32 (4) с	β− (~ 63), и. п. (~ 37)		0,203, 0.506: 0,698; 0,926
121	0,8 (1) с	β−		
123	0,39 (3) с	β−, β−*n*		0,315; 0,354
100	1.1 (3) мин	β+		0,124—0,935
101	1.2 (2) мин	э. з., β+		0,098; 0,925; 1,26; 1,72
102	5,5 (5) мин	э. з., β+		0,415; 0,481; 0,505; 1,037
103	7.3 (1) мин	э. з., β+		0,22; 0,511 (ан.); 0.63: 0,85
104	57,7 (10) мин	э. з., β+		0,084; 0,709
105	55.5 (4) мин	э. з.		0,308; 0,320; 0,347; 0,433;
		β+		0,511 (ан.);
		1,25 (3)		0,607; 0,962; 1,302; 1,693

Продолжение табл. 37.1

Элемент	*A*	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	Т-излучення
	107	**6,50 (2) ч**	э. з. (>99) Г (0,28)	0,302	\ 0,511 (0,56, ан.); 0,796(0,08); / 0,829(0,21)
	108	Стабилен	0,89 (1)	—	—
	109	464 (1) сут	Э. з.	—	0,088 (4)
	ПО	1 Стабилен	**12,49 (9)**	—	
	111		**12,80 (6)**		
	111т	48,6 (3) мин	**и. п.**		0,150(30); 0,247(94) 0.396
	112	Стабилен	24,13 (11)	—	–
	113	9,3 (19) X X 10lS лет	12,22 (6)		
	П3т	14,1 (5) года	Р- (99,9) и. п. (0,1)	0,5 Г —	L 0,264 *1*
	114	Стабилен	28,73 (21)	—	–
	115	53,46 (10) ч	Р-	1,11	0,262(2); 0,49(10); 0,53(26)
	115т	44,6 (3) сут	Р-	1.62	0,485(0,3); 0,935(1,9); 1,29(0\9)
	116	Стабилен	7,49 (9)	–	–
	117	**2,49 (4) ч**	**Р-**	2,23	0,273(31); 0,345(18); 0,434(13); 1,303 (19); 1,577 (17)
	117m	**3,36 (5) ч**	Р-	0,67	0,273(18); 0,880(10); **1,24** (11); 1,433(10); 1,998(15)**
	118	50,3 (2) мин	g_	- 0 , 8	
	119	2,69 (2) мин	0-		0,293; 0,343
	I19m	2,20 (2) мин	р-	—	0,146; 1,025; 2,021
	120	50,80 (21) с	р-	—	—
	121	13,5 (3) с	Р-		0,324; 0,349; 1,041
	126	0,506 (15) с	Р-	–	0,260: 0,428
	128	0,94 (5) с		—	–
	102	23 (4) с	Э. з.		0,593; 0,777; 0,861
	103	65 (7) с	р^	4.4	0,188; 0,202; 0,720; 0,740
	104	25 (6) мин		—	•—
	105	5,1 (3) мин	*Н**	3,9	0,131; 0,260; 0,604
	106	6,2 (1) мин	Р-	2,0	0,511 (ан.); 0,63; 1,65; 1,85
	107	32,4 (3) мин	Р^ Э. з.	2,2	} 0,22(46); 0,511 (ан.)
	I07m	**50,4 (6) с**	и. п.		0,678
	108	**57 мин**	Э. з.	1,29	1 0,150; 0,175; 0,243; 1 0,511 (ан.); 0,633; 0,872
	109	**4,2 (1)4**	э. з. (94) (6)	0,79	\ 0,205; 0,28**; 0,35**; 0,65**; 1 0,91**
	I09mi	1,34 (7) мин	и. п.		0,650
	109^2	0.21 (1) с	и. п.	-	0,40(20); 0,68(100;; 1,04(20);
	ПО	66 мин	(71) э. з. (29)	2,25	\ 0i51/(142, ан.); 0,658(95); / 0,885; 0,937
	111	2,83 (1) сут	Э. з.	–	0,173 (89); 0,247(94)
	I11m	7,7 (2) мин	и. п.	–	0,537
	1J2	**14,4 (2) мин**	р- (44) Г (22) з. з. (34)	0,66 1,56	**0,511 (44, ан.); 0,617(6)**
	П2т	20,9 (2) мин	и. п.		0,156(9)
	ИЗ	Стабилен	4,3(2)	—	–
	I13m	1,658 (1) ч	и. п.	—	0,392
	114	**71,9 (1) с**	р- (98) э. L (1,9) (0,004)	1,988 0,42	**1,299(0,17)**
	П4т	49,51 (1) сут	и. п. (96,7) э. з. (3,3)	—	\ 0,190(17); 0,558(3,5); f 0,724(3,5)

Продолокение табл. 36.5

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного %	МэВ (относительная интенсивность, %)
115	4,41-10" лет	95,7 (2)	—
		г	0,48
115/7!	4,486 (4) ч	и. п. (95)	
		Г (5)	0,83
116	14,10(3) с	Р-	3,3
		г	1,00
116^1	54,15 (6) мин		
116/И2	2,18 (4) с	и. п.	
117	43,8 (7) мин	р-	0,74
117т	116,5 (7) мин	и. п. (47)	–
		р- (53)	1,78
	5,0 (3) с		4,2
119	2,4 (1) мин	Г	1,6
119т	18.0 (3) мин	Р- (95)	2,7
		и. п. (5)	–
120	3,2 с		5,3
121	23.1 (6) с	J-	2,5
121т	3,88 (10) мин	i- (98,8), и. п. (1-2)	–
122	10,0 (5) с	5-	5
123	5,98 (6) с	0-	3,3
123т	47,8 (5) с	0-	4,5
124	3,21 (6) с	0-	3,9
125	2,33 (4) с	0-	4,3; 4.1
126	1,45 (22) с	в-	4,2
127	1,15 (5) с	й-	5,8; 4,9
128	0,9 (1)	Q-	5,0
129	0,59 •	й-	6,8; 5,5
130	0,53 (5)	Р-, г «	—
106	2.10 (15) мин	Э. З.	—
107	2,90 (5) мин	Э. З.	–
108	10,30 (8) мин	Э. З.	–
109	18,0 (2) мин	Э. З.	–
			2.5
ПО	4.11 (10) ч	Э. З.	
111	35.3 (8) мин	з. З. (73)	
			1,51
112	Стабилен	0,9?(1)	
113	115,09 (4) сут	Э. З.	
113т	21.4 (4) мин	и. п. (91), З. (9)	
114		0,65 (1)	
115		0,36 (1)	
116		14,53 (11)	
117		7,68 (7)	
117т	13,61 (4) сут	и. п.	
118	Стабилен	24,22 (11)	
119	293,0(13) сут	8,58 (4)	
119т	Стабилен	п. п.	
120	27,06 (4) ч	32,59 (10)	
121	55 (5) лет		0,383
121т	Стабилен		0,42
122	129,2 (4) сут	4,63(3)	
123	40,08 (7) мин		1,42
123т	Стабилен	Г-	**1,26**
124	9,64 (3) сут		2,34
125	9,52 (5) мин		2,04
125т	-1-105 лет		0,3
126	2,10 (4) ч		3,2
127	4,13 (3) мин		2,7
127т	59,1 (5) мин		**0,80**
128			

0,434(0,12); 0,95(0,1); 1,293(1,2)
0,417(36); 1,09(53); 1,293 (80); 2,111(20)
0,164; 0,290
0,158(87); 0,565(100)
I 0,158(14); 0,315(31)
1,230(15)
0,82 (95)
I 0,024; 0,311; 0,91*
1,171 (15)
0,262; 0,657; 0,926
0,314
0,99; 1,14
1,020; 1,131
0,126
0,99/3/; 1,13/10/; 3,21/3/
1,032; 1,335
0,909; 1,141
1,598
1,169; 3,520
1,865; 2,119
0,774; 1.221

0,253; 0,387; 0,477
1,129
0,28; 0,42; 0,67
\ 0,335; 0,521; 0,89; 1,12; 1,32;
/ 1,46
0,283(95)
1 0,511 (54, ан.); 0,75(1,1);
/ 1,14(1,8); 1,89(1,0); 1,92

0,^5(1,8)
0,077 (0,6)

0,158(87); 0,315

0,024 (16); 0,090

0,037

0,160

0,811 (1,5); 0,904(1,4); 1,068(4); 1,97(0,6)
0,325(97)
0,060; 0,067; 0,092
0,823; 1,096; 1,114
0,49(100)
0,044(7); 0,072(19); 0,50(61); 0,57 (22)

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относите^ групп частиц	ensивность, %)
	6,5 (5) с	и. п.		0,832; 1,169
129	2,16 (4) мин		3,3	0,642; 2,100
129т	6,7 (4) мин	и. п.,		
130	3,72 (11) мин		1,5; 1,1	0,192; 0,780
130т	1,7 (1) мин			0,084; 0,145; 0,311; 0,899
131	61 (3) с			0,305; 0,450; 1,23
132	40 (1) с			0,085; 0,247; 0,340; 0,899
				0,992
	1,04 (2) с	р-, 17)		
109	18.3 (5) с		5,4; 4,4	0,925; 1,062; 1,496
ПО	23.0 (4) с		6,9	0,827; 0,985; 1,212; 1,243
111	75 (1)' с		3,3	0,154; 0,489
112	51.4 (5) с		4,8	0,511 (ан.); 1,26
113	6,67 (7) мин		2,42	0,32; 0,511 (ан.); 1,03; 1,2*
	3,49 (3) мин	Э. 3.		0,9;
			4,0	1,30
	32.1 (3) мин	э. 3. (67)		0,499(100); 0,511 (67, ан.);
		(33)	1,5	0,98(5); 1,24(5)
116	15,8 (8) мин	э. 3. (72)		0,511 t56, ан.); 0,93(26);
		(28)	2,3~	1,293 (85); 2,23(14)
И 6т	60,3 (6) мин	э. 3. (81)		0,099(30); **0,140**(30);
		(19)	1,16	0,406(36); 0,511 (38, ан.);
				0,545 (68); 0,96(75); **1,06**((27);
117	2,80 (1) ч	3. (97,4)		1,293 (100)
		(2,6)	0,57	0,158 (87); 0,511 (5, ан.)
118	3.6 (1) мин			0,511 (150, ан.) 0,83(0,4);
			2,67	1,230*(3)
I18m	5,00 (1) ч	3. (>1		0,041 (29); 0,254(93);
		(0,16)		1,049(100); 1,230(100)
119	38,1 (2) ч			0,024 (16)
120	15,89 (4) мин		1,70"	0,511 (87, 1.); 1,171 (1,3)
121	Стабилен	57,3 (9)		
122	2.70 (1) сут	р.- (97)	2,0; 1,4	0,564(66); 0,686(3,4)
		з. 3. (3)		
		(0,006)	0,56	
123	Стабилен	42,7 (9)	**2,зГ**	0,603(97); 0,72*(14); 1,691 (50)
124	60,20 (3) сут			0,505(20); 0,603 (20); 0,644 (20)
124mi	93 (5) с	и. п. (80)		
		р- (20)		0,035
124m2	20,2 (2) мин	и. п.		0,427(31); 0,463(10;;
125	2,73 (3) года		**0,61**	0,599*(24); 0,634 (11)
				0,41; 0,69**
126	12,4 (1) сут		1,9	0,018
126m	19,0 (3) мин	Р (86), и. п. (14)		0,46; 0,68; 0,77
127	3,85 (5) сут		1,5	0,320(83); 0,75*(200)
128	9.01 (3) ч		**2,0**	0,54; 0,81; 0,91
129	4,40 (1) ч		**2,2; 0,6**	0,19; 0,33; 0,82**; 0,94
130	40 (1) мин		2,9	0,182; 0,8'40
130m	6,3 (2) мин		3,2; 2,2	0,64(37); 0,94 (48)
131	23 (2) мин		3,0; 1,3	0,104; 0,151; 0,697; 0,974
132	4.2 (1) мин		3,7	0,837; 1,096; 1,729; 2,416;
133	2,7 (1) мин		2,4; 1,2	2,755
				1,279
135				
	0,82 (2) с			

	Период полураспада	Тип распада или ртно-распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная
	2,1 (1) с		3,32 2,6; 3,4; 3,7
109	4,		
110	с		0,108; 0,219; 0,606; 0,895
111	19,3 (4) с	*y ,*	0,851; 0,881; 1,268; 1,392
112	2,0 (2) мин		0,296; 0,373; 0,419
113	1.7 (2) мип		0,645; 0,814; 1,018; 1,181
114	15,2 (7) мин		0,84; 0,90; 0,245; 0,727; 1,
115	5.8 (2) мин		0,511 (160, ан.); 0,72 (34); 1,28(32); 1,38 (32)
115/п	6,7 (4) мин		
116	2,49 (4) ч		0,094, 0,103
117	62 (2) мин		0,511 (60, ан.); 0,72(65);
		(30)	1,81 0,93(6); 1,78(9)
	0,103 (3) с		
	6.00 (2) сут		
119	16.05 (5) ч		0,645 (85); 0,70(11); 1,76(3,
			0,627 0,153(62); 0,270(25);
119т	4,69 (4) сут		1,221 (67); 2,09(4)
120	Стабилен		
121	16,78 (35) сут		0,508(18); 0,573(80
121т	154 (7) сут		0,212(82); 1,10(3)
122	Стабилен		
123	> 1.1013 лет		
123т	119,7 (1) сут		0,159(84)
124	I Стабилен		
125			
125т	58 (1) сут		0,035(7); 0,110(0,3)
126	Стабилен	S,95 **(1)**	
127	9,35 (7) ч		0,70 0,058(0,01); 0,21*(0,03);j 0,360(0,05); 0,417(0,3)
127т	109 (2) сут		\ 0,059(0,19); 0,088(0,08); J 0,67(0,004)
128	>8-102^ лет		
129	69.6 (3) мин		1,45 0,027 (19); 0,455(15)
129т	33.6 (1) сут		1,60" \ 0,69; 0,106
130	2,51 (27) X X W лет		
131	25,0 (1) мин		2,14 0,150(68); 0,453 (16)
131т	30 (2) ч		2,46(5); О, 0,78«(60); 0,85*(31); 1,127**(13);** 1,206(11)
132	78,2 (8) ч		**0,22** 0,053(17); 0,230(90)
133	12,45 (28) мин		3,2; 2,8 0,312; 0,408; 1,333
133т	55,4 (4) мин		2,4 0,432(50); 0,557(35); 0,754(85); 0,91 (57)
	41 ,8 (8) мин		0,7 0,08(13); 0,17(16); 0,204 (21); 0,262(19)
135	18 (1) с		6,0; 5,4
136	20.7 (20) с		0,267; 0,604; 0,870
137	3,5 (5) с		
138	1,4 (4) с		0,244
111	2,5(2) с		3,152 0,117; 0,321; 0,341; 0,266
112	3,42 (11) с		0,689; 0,787; 0,795; 1,143
114	2.1 (2) с		6,5~ 0,682; 0,709; 0,775; 1,091
115	1,3 (2) мин		
116	2,91 (15) с		6,7 0,540; 0,679
117	2,3 (1) мин		3,5 0,16; 0,34; 0,511 (ан.)
118	13,7 (5) мин	(~ 54) э. 3. 46)	5,5 0,511 (108, вн.); 0,55; 0,60; 1,15; 1,34

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) групп частиц	
118/п	8,5 (5) МиН	Э. З., и. п.		104; 0,60
119	19.1 (4) мин	э. З. (49) К' (51)	2,4	26; 0,511 (102, ан.);0,78
	81,0 (6) мин	э. З. (54) (46)		0,511 (92, ан.); 0,56; 0,е 1,52
	53 (4) мин			,56; 0,60; 0,61
	2,12 (1) ч	э. З. (91)		212 (90); 0,32 (6); ,511 (18, ан.)
122	3,62 (6) мин			,511 (ан.); 0,564; 0,69; 0,78
123	13,2(1) ч			,159(83)
124	4Л8 (2) сут	Г. з! (74)		511 (50, ан.г. 0,605(67), 644(12); 0,73(14); 1,69(14)
125	60,14 (11) сут	Г f*^^		,035 (7)
126	13.02 (7) сут	Г. з! (55) Г (44) (1,3)	1,25 1,13	,386(34); 0,667(33)
	Стабилен	**100**		
	24,99 (2) мин	р- (93,6) э. З. (6,4)	2,12	0,441 (14); 0,528(1,4)
129	1,57 (4) Х Х 10' лет		0,150	0,040(9)
	12,36 ч		1.7(0,4): 1,04	0,419(35); 0,538(99); 0,669(100); 0,743(87)
130т	9,0 (1) мин	л. (83), Г (17)		0,048; 0,536
131	8,04 (1) сут		0,806(0,6); 0,606	0,284(5,4); 0,364(82); 0,637 (6,8)
132	2,30 (3) ч		2,12	0,52**(20); 0,67**(144); 0,773(89); 0,955(22)
132га	83,6 (7) мин	и. п. (86), р-(14)		0,175; 0,60; 0,67; 0,77
133	20,8 (1) ч		1,27	0,53(90)
133га	9 с	н. п.		0,073; 0,647; 0,913
134	52,6 (4) мин		2,43	0,61 (18); 0,85(95); 0,89(65); 1,15(10)
134га	3,69 (7) мин	и. п. (98), р-(2)		0,316; 0,847; 0,884
135	6,61 ч		2,2; 1,4	1,14(37); 1,28 (34); 1,46(12); 1 ,72 (19)
	84 (1) с		7,0(6); 5,6	0,27(18); 0,39(19); 1,32** (95,; 2,3** (19)
137	24,5 (2) с	р-« (6)		**0,601; 1,218**
138	6,41 (6) с	-, (5)		0,484; 0,589; 0,875; 2,262
139	2,30 (5) с	р-и (10)		0,528; 0,537; 0,571; 0,848
140	0,86 (4) с	-, (14)		0,377; 0,458
141	0,41 (8) с	Р-		0,192; 0,303; 0,387; 0,579
112	2,8 (2) с		3,210	
114	10.0 (4) с			0,104; 0,162; 0,309; 0,440
116	56 (2) с		3,3	0,248; 0,311
117	61 (2) с	ч р-^р (0,003)		0,221; 0,295; 0,519; 0,661
119	5,8 (3) мин			0,10; 0,23; 0,46
120	40 (1) мин			0,055; 0,073; 0,176; 0,76
121	40.1 (20) мин		**2,8**	0,080; 0,096; 0,132; 0.437; 0,511 (ан.)
	20,1 (1) ч			0,060: 0,090; 0,110; 0,148; 0,180; 0,345; 0,417
	2,08 (2) ч			0,090; 0,110; 0,149; 0,178; 0,329; 0,511 (ан.); 0,68; 0,90; 1,10
124	Стабилен	0,10 (I)		
125	16,9 (2) ч	э. З., р		0,055; 0,188: 0,242
125т	57 (1) с			0,075; 0Л11; 0,140
126	Стабилен	0,09 (1)		
127	36,4 (1) сут			0,172 (22); 0,203 (65); 0,375 (20)

	Период полураспада	Тип распада или относ. распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
127т	69,2 (9) с	и. п.		0,125; 0,175
128		1,91 (3)		
129	1 Стабилен	26.4 (6)		
129т	8,89 (2) сут	и. п.		0,040(9); 0,197(6)
130	1 Стабилен	4,1 (I)		
131		21,2(4)		
131т	11,9 (1) сут	и. п.		0,164(2)
132	Стабилен	26,9 (5)		
133	5,29 (1) сут	Р	0,346	0,081 (37)
133/п	2,19 (1) сут	и. п.		0,233(14)
134	Стабилен	10,4 (2)		
135	9,083 ч		0,92	0,250(91); 0.61 (3)
135/л	15.6 мин	и. п. (>99), р- (0,004)		0,527
136	Стабилен	8,9(1)		
137	3,818 (13) мин			0,455 (33)
138	14,08 (8) мин			0,16/33/; 0,26/100/; 0,42/40/: 1,78/66/; 2,02/58/
139	39,68 (14) с			0,18/41/; 0,22/100/; 0,30/57/; 1,15/23/
140	13,60 (10) с			0,622; 0,806; 1,315; 1,414
141	1,72 (3) с	S-, (0,05)		0,106; 0,119; 0.909
142	1,22 (2) с	, Гп (0,41)		0,54; 0,57; 0,62; 0,66
144	1,15 (20) с			
145	0,9 (3) с			
117	8(2) с			
118	16,4 (12) с	(0,04)		
120	60,2 (15) с			0,332
121	125,6 (14) с			
122	4,5 (2) мни			
123	5,87 (5) мин		3.1	0,097; 0,597
123т	1,60 (15) с	и. п.		0,64; 0,95
124	26,5 (15) с		4,9	0,354; 0,493; 0,915
125	45 (1) мин	*1. 3.* (51) (49)	2,0^	I 0,112; 0,511 (98, **ан.)**
126	1,64 (2) мин	(82) **э. 3.** (18)	3,8	1 0,386(38); 0,511 (164, ан.); *f* 0,925
127	6,25 (10) ч	э. 3. (96,5) (3,5)		\ 0,125(10); 0,406(72); ; 0,511(7, ан.)
128	3,62 (2) мин	(51) э. 3. (49)	2,9	} 0,441 (27); 0,511 (ПО, ан.)
129	32,06 (6) ч	Э. 3.		0,375v48); 0,416(25); 0,550 (5)
130	29,9 мин	fl+	1,97	0,54; 0,59
		г (1.6)	0,442	
131	9,69 (1) сут	Э. 3.		
132	6,475 (10) сут	э. 3. (97)	0,40	0,48* (4г. 0,668(99)
133	Стабилен		0,8	
134	2.062 **(5)** года		**0,662**	0,57**(23); 0,605(98)3 0,796** (99)
	2,91 (1) ч	и. п.	0,55	0,127 (14)
135	2,3-10® лет	t C)	**0,21**	
135m	53 (2) мин			0,781 (100); 0,840(96)
136	13,16 (3) сут		0,657 (7); 0,341	0,16** (36); 0,340(53)5 0,818(100); 1,05(82)
137	30,0 (2) лет		1,176(7); 0,514	0,662 (85)

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная	
	32,2 (1) мин			0,463 (23); 1,01 (25); 1,426 (73); 2,21 (18)
		и. п. (75), р- (25)		0,080; 0,463; 1,436
			4.2	1,28; 1,42
			6,2; 5,6	0,59; 0,88; 1,14; 1,62; 1, 85; 2,06; 2,32; 2,72; 3,15
141	24,94			0,048; 0,562; 0,589; 1,194
142				0,360; 0,967; 1,326
143				0,196; 0,232; 0,306
144				0,20; 0,56; 0,64; 0,76
145				**0,11; 0,18; 0,20**
146				
117				
119				
121				
123				0,094; 0,116; 0,124
124				0,17; 0,19; 0,27; 1,22
125			3,4	0,08; 0,14
126				0,23/100/; 0,70/33/
127			2,4	0,07; 0,12; 0,18
128				0,134; 0,278
129				0,129/26/; 0,182/100/;
			1,42	0,21**/65/; 1,45/42/
130				
131				0,124** (28); 0,216(19):
131т				0,373 (13); 0,496** (48)
132				0,107 (40)
133				
				0,080** (36); 0,303(14);
133/л	38,9 (1) ч			0,356 (69)
				0,276 (17)
134	Стабилен			
135	28.7 (2) ч			0,268 (16)
135т	Стабилен			
136	2,5513 (7) мин			
137	Стабилен			
137т	84,6 (4) мин	71,70 (7)		
138	12,746 (10) сут			0,166(23); 1,43(0,4)
139	18,27 (7) мин			0,030(11); 0,537 (34)
140				0,193/100/; 0,28/50/;
141	10,6 (2) мнн			0,46**/30/; 0,64/20/
				0,080/30/; 0,26/100/; О, 1,20/35/
143	14,5(5) с		4,2	0,211; 0,799; 0,980; 1,011
144	11,4 (5) с		2,9: 2,4	0,10; 0,16; 0,39; 0,43
145	4,31 (16) с		4,9	0,09; 0,38; 0,42
146	1,91 (16) с		3,9	0,12; 0,14; 0,25
148	0,47 (20) с			0,13; 0,42; 0,55
123	17 (3) с			
125	76 (6) с	*i*+		
126	1,0 (3) мин			256; 0,511 (ан.)
127	3,8 (5) мин			056
128	5,0 (3) мин		3,2	279; 0,511 (ан.)
129	11,6 (2) мин	Г . , , .	2,7; 2,4	И; 0,25; 0,28; 0,46
129т	0,56 (5) с	и. п.		172
130	8,7 (1) мин	э. з.,		356; 0,45; 0,511 (ан);
				55; 0,72; 0,81; 0,91; 1,01;
				19: 1,45; 1,55
	59 (2) мин	э. 3. (72)	**135**	115(23); 0,364(20);
		Г (28)		417(20); 0,511 (56, ан.)

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относ. распростр. стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %> групп частиц	
132	4,8 (2) ч		3,7; 3,2	0,47; 0,511 (ан.); 0,56; 0,66; 1,03; 1,22; 1,58; 1,91
133	3,912 (8) ч	**э. 3.**	1,2	} 0,511 (ан.); 0,62; 0,63
	6,45 (16) мин	э. 3. (38) **Г (62)**	2,7	I 0,511 (124, ан.); 0,605(6)
135	19,5 ч	**э. 3.**		0,481 (1,9); 0,588 (0,13);
136	9,87 (3) мин	э. 3. (67) Р^ ^33)		0,87" (0,24)] 0,511 (66, ан.); 0,818(2,5)
137	6 (2)-10« лет 1,28 (12) Х Х 10" лет	о", 09(1) **э. 3.** (~ 6; р- (~ 32)	**0,21**	0,81(30); 1,436 (70)
139	Стабилен	99,91 (1)		
140	40,272 (7) ч		2,175(6); 1,69(15); 1,	0,329 (20); 0,487 (40); 0,815 (19); 0,923(10); 1,596(96); 2,53(3)
141	3,93 (5) ч		2,43	
142	92,5 (5) мни		4,51	0^65 (48); 0,90(9); 1,91 (9); 2,41(15); 2,55^1)
	14,23(14) мин		3,3	0,62/100/; 0,80/44/: 1,07/26/: 1,17/57/; 1,58/28/; 1,98^35/; 2,56/27/
144	40,9 (4) с		4,4; 4,1	0,397; 0,541; С),845
145	24.8 (20) с			0,12; 0,17; 0,36; 0,45; 1,82
146	8,8 (4) с		5,5; 4,5	0,259; 0,410; 0,503
147	4.4 (5) с			
148	1,29 (8) с			0,159
125	11 (4) с			
128	~ 6 мин			
129	3.5 (5) мнн			0,080; 0,32; 0,75
130	25 (2) мин			0,13
131	10 (1) мнн			
132	4,2 (2) ч	Э. 3.	–	**0,18; 0,22-**
133	5,40 (5) ч	э. 3.,	–	0,511 (ан.); 1,8
134	75.9 (9) ч 17,6 ч	Э. 3. г (< 1)	– 0,81	0,^^5/100/; 0,300/56/; О,52**/46/; О,59**/98/
135т	20 с	и. п.	–	0,082; 0,150; 0,296
136	Стабилен	0,19(1)		
137	9,0 (3) ч	э. 3. (>99) «0,01)	– –	0,446**(2,3); 0,481**(0,06): 0,698(0,04); 0,92** (0,1)
137т	34,4 (3) ч	и. п. (99,2)	—	0,168(0,4); 0,254(11);
	Стабилен	э. 3. (0,8) 0,25(1)	– –	0,762(0,16); 0,825**(0,5)
139	137,66 (13) сут	Э. 3.	–	0,165(80)
139т	56,4 (5) с	и. п.	–	0,746(93)
140	Стабилен	88,48 (10)	–	
141		г	0,581	0,145 (48)
142		11,08 (10)		
143	33,0 (2) ч	Р-	1,3^	0,057(11); 0,293(46); 0,668(7); 0,725 (8)
144	284,9 (2) сут		0,31	0,080(2); 0,134 (11)
145	2.98 (15) мин	Г	2,0	0,063; 0,285; 0,440; 0,724; 1,148
	14,2 (5) мин		0,7	0,110/20/; 0,142/42/; 0,22/50/; 0,27/12/; 0,32/100/
147	56,4 (12) с	i-	3,3	0,093; 0,269; 0,374; 0,580
148	48 П) с'	J-	1,7	0,098. 0,121; 0,292
151	1,02 (6) с	i-	–	

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного I, %	Энергия, Л^эВ (относительная групп частиц	
133	6,5 (3) мин			0,74; 0,134; 0,361; 0.465
134	17 (2) мин			0,22; 0,30; 0,409; 0,511 (ан.); 0,639; 0,96
135	~ 22 мин	Э. З.	2,5	} 0,080; 0,22; 0,30; 0,511 (ан.)
136	13,1 (1) мин	э. З. (-67) р+(~33)	3,5; 3,0	I 0,511 (66, ан.); 0,540; 1,092
137	1,28 (3) ч	э. З. (73) Р(27)	1,7	} 0,511 (54, ан.); 0,837
138	1,45 (5) мин			0,789
138ш	2.1 (1)4	э. **3.** (77) (23)		0,298(77); 0,364(9); 0.511 (46, ан.); 0,79(100); 1,04 (100)
	4,41 (4) ч	э. **3.** (89) Г (И)		\ 0,511 (18, ан.); 1,35(0,5); f 1,61(0,3)
	3,39 (1) мин	э. З. (50) Г (50)	2.32	} 0,511 (100, ан.); 1,596(0,3)
141	Стабилен	100		
142	19,13 (4) ч	г (>99); э. З. (0,016)	2,1б"	1,ет(3,7)
142т	14.6 (5) мин			
143	13,58 (3) сут		0,933	
144	17,28 (5) мин		2,99	0,695(1,5); 1,487 (0,29); 2,186(0,7)
144т	7.2 (2) мин	и. п. (99,96), (0,04)		0,059
145	5,98 (2) ч		**1,80**	0,072; 0,68; 0,75; 0,92; 1,05; **1,16**
146	24.07 (13) мин		4,1	0,455^7^; 0,74(16); 0,78(15);
147	13,6 (5) мин		2,7; 2,1	o',078 (17.); 0,127(9); 0,32** (47); 0,56 (39); 0,61 (10), 0,65 (24); 1,26(11)
148	2,30 (3) мин		5,0;4,7	0,30; 1,36
149	2.3 (2) мин		**2,8**	0,08; 0,155; 0,325; 0,36; 0,745
150	6,19 (16) с			0,130; 0,723
151	4,0 (7) с			
134	8,5 (15; мин			0,163
135	12,1 мин			0,204; 0,441; 0,502
136	50,65 (33) мин			0,109; 0,149; 0,575
137	38,5 (15) мин			0,109; 0,511 (ан.); 0,55**
137т	1,60 (15) с	и. п.		0,178; 0,286
138	5.04 (9) ч	Э. з		0,326
139	29,7 (5) мин	Э. З.		0,41; 1,07
I39m	5.5 (2) ч	и. п. (12), э.	3,1	0,114/80/; 0,327/50/; 0,511/1400/; 0,73*^^/210/; 0,82**/70/; 0,983/70/
140	3,37 (2) CVГ	Э. З.		
141	2,49 (3) ч"	з. З. (90)		1 0,145(0,2); 0,511 (6, ан.); I 1,14(2); 1,30(1)
141m	62,4 (9) с	и. п. (99,97), э. З. (0,03)		} 0,756
142	Стабилен	27,13 (10)		
143		12,18 (5)		
144	2,4.1015 лет	23,80 (10)	1,83	
162	> МО" лет	8,30 (5)		
162т	Стабилен	17,19(8)		
163	10,98 (1) сут		0,9; 0,81	0,091 (28); 0,319(3); 0,43**(4); 0,533(13)

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного I, %	Энергия, Л^эВ (относительная групп частиц	
133	6,5 (3) мин			0,74; 0,134; 0,361; 0.465
134	17 (2) мин			0,22; 0,30; 0,409; 0,511 (ан.); 0,639; 0,96
135	~ 22 мин	Э. З.	2,5	} 0,080; 0,22; 0,30; 0,511 (ан.)
136	13,1 (1) мин	э. З. (-67) р+(~33)	3,5; 3,0	I 0,511 (66, ан.); 0,540; 1,092
137	1,28 (3) ч	э. З. (73) Р(27)	1,7	} 0,511 (54, ан.); 0,837
138	1,45 (5) мин			0,789
138ш	2.1 (1)4	э. **3.** (77) (23)		0,298(77); 0,364(9); 0.511 (46, ан.); 0,79(100); 1,04 (100)
	4,41 (4) ч	э. **3.** (89) Г (И)		\ 0,511 (18, ан.); 1,35(0,5); f 1,61(0,3)
	3,39 (1) мин	э. З. (50) Г (50)	2.32	} 0,511 (100, ан.); 1,596(0,3)
141	Стабилен	100		
142	19,13 (4) ч	г (>99); э. З. (0,016)	2,1б"	1,ет(3,7)
142т	14.6 (5) мин			
143	13,58 (3) сут		0,933	
144	17,28 (5) мин		2,99	0,695(1,5); 1,487 (0,29); 2,186(0,7)
144т	7.2 (2) мин	и. п. (99,96), (0,04)		0,059
145	5,98 (2) ч		**1,80**	0,072; 0,68; 0,75; 0,92; 1,05; **1,16**
146	24.07 (13) мин		4,1	0,455^7^; 0,74(16); 0,78(15);
147	13,6 (5) мин		2,7; 2,1	**o',078** (17.); **0**,127(9); 0,32** (47); 0,56 (39); 0,61 (10), 0,65 (24); 1,26(11)
148	2,30 (3) мин		5,0;4,7	0,30; 1,36
149	2.3 (2) мин		**2,8**	0,08; 0,155; 0,325; 0,36; 0,745
150	6,19 (16) с			0,130; 0,723
151	4,0 (7) с			
134	8,5 (15; мин			0,163
135	12,1 мин			0,204; 0,441; 0,502
136	50,65 (33) мин			0,109; 0,149; 0,575
137	38,5 (15) мин			0,109; 0,511 (ан.); 0,55**
137т	1,60 (15) с	и. п.		0,178; 0,286
138	5.04 (9) ч	Э. з		0,326
139	29,7 (5) мин	Э. З.		0,41; 1,07
I39m	5.5 (2) ч	и. п. (12), э.	3,1	0,114/80/; 0,327/50/; 0,511/1400/; 0,73*^^/210/; 0,82**/70/; 0,983/70/
140	3,37 (2) CVГ	Э. З.		
141	2,49 (3) ч"	з. З. (90)		1 0,145(0,2); 0,511 (6, ан.); I 1,14(2); 1,30(1)
141m	62,4 (9) с	и. п. (99,97), э. З. (0,03)		} 0,756
142	Стабилен	27,13 (10)		
143		12,18 (5)		
144	2,4.1015 лет	23,80 (10)	1,83	
145	> МО" лет	8,30 (5)		
146	Стабилен	17,19(8)		
147	10,98 (1) сут		0,9; 0,81	0,091 (28); 0,319(3); 0,43**(4); 0,533(13)

Продолжение табл. 37.1

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	7-излучения
	148	Стабилен	5,76 (3)		—
	149	**1,73 (1) ч**		1,5	0,114(18); 0,210 (27): 0,27** (26); 0,541 (10)
	150	Стабилен	5,64 (3)		–
	151	**12,44 (2) мин**	**Г**	2,3; 1,2	0,118 (40); 0,174** (10); 0,256 (11); 1,180(9)
	152	11,4 (2) мин		1,2:0,9	0,250; 0,279
	154	40 (10) с	Г	—	0,40; 0,70
иРга	136	107 (6) с	Э. з.	—	0,374; 0,603, 0,815: 0,858
	137	2,4 (1) мин	Э. з.		0,108; 0,178; 0,269; 0,581
	138	3,24 (5) мин	Э. з.		0,521; 0,729
	139	4,15 (5) мин		3,0	0,368; 0,403; 0,463
	140	9,2 (2) с	г	5,1	0,717; 0,774; 1,499
	141	20,90 (5) мин	г (57) э. з. (43)	2,6	1 0,195(13); 0,511(114, ан.)
	142	40,5 (5) с	**(~ 95)** **э. з. (~ 5)**	3,78	1 0,511(190, ан.); **1**,576
	143	265 (7) сут	Э. з.	—	0,742(47)
	144	363 (14) сут	Э. з.	—	0,474(45); 0,615(99); 0,695 (99)
	145	17,7 (4) года		2,24	} 0,067 (1,0); 0,072(2,3)
	146	2020 (18) сут	**э. з. (63)** **Г,37)**	0,78	1 0,453 (65); 0,75* (65)
	147	2,6234 (2) года		0,224	–
	148	5,37 (1) сут	Р-	2,48	0,551 (27); 0,914 (15); 1,465 (23)
	148т	**41,3 (1) сут**	Р- (95) и. п. (5)	1,0; 0,4 —	\ 0,551 (95); 0,630(87); / 0,727 (36); 0,137
	149	**53,08 (5) ч**	Р-	1,07	0,286(2); 0,58(0,1); 0,85(0,2)
	150	**2,68 (2) ч**		3,05	0,334(71); 0,831 (18); **1,165(23); 1,33 (22)** **0,17** (18); 0,340(21)**
	151	28,40 (4) ч	R-	1,19	0,122; 0,841; 0.96*
	152	4,1 (1) мин	R-	3,5	0,120; 0,245
	152/п	7,5 (2) мин	H-		0,12; 0,18
	153	5,4 (2) мин	S-	1,65	0,08; 0,18; 1,44
	154	2.7 (1) мин		2,5	
eaSm	134	12 (3) с		—	—
	137	44 (8) с	–	–	–
	138	3,0 (3) мин			0,05; 0,075
	139	2,57 (1) мин		3,6	0,274; 0,306; 0,597
	139т	9,5(1) с	и. п. (93,7), э. з. (6,3)	—	0 ,155; 0.189
	140	**14,82 (10) мни**		1,9	0,23; 0,14
	141	**10,2 (2) мин**	Э. з.,	–	0,20; 0,43; 0,78
	141т	22,6 (2) мин	з. з. (99,69), и. п. (0,31)	—	
	142	72,49 (5) мин	э. з. (~30) (-50)	1,03	} 0,15-0,35**; 0,511 (100, ан.)
	143	8,83 (2) мин	э. з. (52) Г (W	2,5	1 0,511 (100, ан.); 1.06
	143т	66 (2) с	з. з. (0,20), и. п. (99,80)	—	0,754
	144	Стабилен	**3,1 (1)**	–	–
	145	340 (3) сут	Э. з.	–	0,061; 0,485
	146	1,03 (3) X X 10» лет	<2.10-', а	2,47	—
	147	1,06 (2) X X 10'і лет	15,0 (2) ***а***	2,23	—
	148	« (2)-1015 лет	**11**,3 **(1)**	1,96	} -

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
149	>1,10^" лет	13,8 (1)		
150	Стабилен	7,4(1)		
151	90 (6) лет	*Г*		0,022 (4)
152	Стабилен			
•153	46,7 (1)	26,7 (2)		0,070(5,4); 0,103(28)
154	Стабилен			
155	22.1 (2) мин	22,7 (2)	1,53	0,104 (73);-0,246 (4).
156	9,4 (2) ч .		0,72	0,088 30); 0,166 (10); 0,204 (20)
157	8,0 (5) мин		2,4	0,20; 0,39
158	5;5.1- (9) ыда			0,19; 0,32; 0,36
139	22 (3) с			
141	40,0 (7) с			0,39*; 0,59
I41m	:3,зл3) с	э. 3. (67), и. и; (33)		0,096
142	2,4 *(2)* с			0,77
142/п	1,22 (2) мин	Г . , , .		0,77; 1 ,03
143	2,63 (5) мин			0,511 (ан.); 1,11, 1,54; 1,80; 1,91
144	10,2 (1) с		5,2	0,511 (ан.); 0,818; 1,660
145	5,93 (4) су	э. 3. (99)		
		Г (1)	1,7 [2]	0,656/30/; 0,894/100/; 1,66/16/
	4,61 (24) сут	э. 3. (96,5)		
		Г (3,5)	2,140,14); 1,47(3,3)	0,511 (7, ан.); 0,634* (77); 0,749 (100)
	24 (1) сут	э. 3. (89,5)		
		(0.5)		I 0,122 (20);0,198 (24); 0,680 (И);
		а (0,002)	2,91	1 0,957(9); '1,079 (9)
	54,5 ,сут	э. 3. (>99)		\ 0,551** (ia0): 0,62*^ (90);
			0,92	j 0,72** (18)
			2.63	
149	93 „I (4) сут	Э. 3.		0,277/10/; 0,328/1(}/
150	.12,62 (10) ч	Р- (90)	1,01	0,334 (4); 0,406(3);
		э. 3. (9)		0,511 (0,8;.ан.)
		6+ (0,4)	1,24	
	'Стабилен	47,8 (5)		
	13S33' (4) года	э. 3. (73)		0,122(37); 0,344(77);
				0,965 (15)Г 1,408(22)
		(^ofo21)	0,71	
152mi	9,32 (1) ч	р- (76)		0,046; 0,122(8); 0,842(13);
		э. 3. (24)		0„963 {.1?)
		Г (0,011)		0,090; 0,148
152/П2	(1) мин ,			
153	• Стабилен	52,2 "(5)		
154	8,8 (1) года	р- (99,98),	1,85 (10); 0',87-	0,123(38); 0,724 (21);
		э. 3. (0,02)		0,876 (^2);" 1,00* (31);
154ОТ	46,0 (3) мин			0^068; 0.'401
155	4,96 (1) года		0,25	0,087 (32); 0,105(20)
156	t5,19 (6) сут		2,45	0,089(8); 0,812(9); 1,07**(11); 1,15** (14); 1,24** (16)
157			1,3	0,064 (27)^0,37* (14); 0,413(27)
158	ми'н		3,4; 2,5	0,08()/lb0/; 0,52**/25/; 0,95**;,/^5/; 1,19/16/
159	18,7 (4) мин			0,07 (42); 0,09(18); 0,15(14); 0,67 (21)
160	•5© (Д0) **О**			0,075; аД7; 0,41; 0,52: 0,82
142	1,5 (3) мин	э 3.		0,179
143	39 (2) с	э. 3.		0,20; 0,46
144	4,5 (1) мин		**3,3**	0,333; 0,347

i

<1020

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)!	
145	23,9 <1) мин			0,511 (ан.); 0,80/9/; 1,03/10/; 1,75/100/.
145т	85 (3) с	и. п. (95,3), э. З. (4,7)		0,749
146	48.3 (1) сут	э. 3., В+		0,078/30/; 0,115**/lb0/; 0,155/45/
147	38,1 (1) ч			0,229/150/; 0,39**/85/; 0,64**/70/; 0,77**/60/; 0,932/60/
148	93 (6) года		3,183 (100)	
149	9,4 (3) сут	э. 3. (>99) **а (~ 0,001)**	3,01	0,150(48); 0,299(26); 0,347 (25); 0,750(11)
150	1,79 (8) X X 10" лет		2,72 (100)	
151	120 (20) сут	а (-8-10-')	**2,60**	0,0216(3); 0,154(7); 0,175 (3); 0,244 (7)
152	1,08 (8) X X 10^ лет	0,20(1)	2,14	
153				0,070(2,4); 0,099** (55)
154	241,6 (2) сут			
155		14,80 (5)		
156		20,47 (4)		
157	Стабилен	15,65 (3)		
158		24,84 (12)		
159	18,56 (8) ч		0,95	0,058(3); 0,363 (9)
160	Стабилен	21, (4)		
161	3,7 (1) мин		1,7; 1,6	0,102(11); 0,315 (25); 0,361 (66)
162	9 (1) мин		**1,0**	0,40; 0,44
	23 (2) с	Э. 3.		1,08; 1,42; 1,58
147	1,65 (10) ч			0,305; 0,511 (ан.); 0,694; 1,152
148	60 (1) мин			0,511 (ан.);0,78; 1,12
149	4,15 (5) ч	**э'. I'.'(L)** а (~ 17)	3,95	} 0,16; 0,35
149га	4,3 (1) мин	э. **з.** О 99) **а (0,020)**	3,99	} 0,796'
150	3,27 (10) ч	э. 3. (>99) а (< 0,05)	3,6 3,49	\ 0,511/100, ан./; 0,6^/100/; I 0,93/35/
	17,6 (1) ч	э. **з.** (>99) а (0,009)	3,41	} 0,108(35); 0,252 (35); 0,288(32)
	17,5 (1) ч	э. 3. (80)	**2,82**	\ 0,344/100/; 0,586/14/; f 0,779/141"
152/rt	4,3 (2) мин	L •^(78),э. **(22)**		0,344; 0,411
153	2,34 (1) сут	э. 3.,		о, о j 3 . . о „ , о , и . . ф ,
	21.4 (5) ч			0,123; 0,248; 0,347, 0,53**; 0,65**
155	5,32 (6) сут			0,087 (37J; 0,105 (25); 0,180 (8)
156	5,34 (9) сут	з. 3.		0,089(17); 0,199^40); 0,535(70); 1,22(29); 1,42(15)
156m	5,0 (1)4	и. п.		0,688
157				
158		э". з". (82), р- (18)		0,08"; 0,94; 0,96
158т	10.5 (2) с	и. п.		0,110(0,5) "
159	Стабилен	**100**		
,160	72,3 (2) сут		1,74(0,4); 0,86	0,087(1?); 0,299(30)! ; 0,879 (31); 0,966** (31);' 1,178(15)
	6,91 (2) сут		0,59 (10); 0,52	0,026 (21)i 0,049(19): 01,075(10)
	7.7 (2) мин		2,4; 1,4	0,180/26/; 0,258/lbp:/; ' 0,81/44/; О,80/5V

Продолжение табл. 37.1

A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
			групп частиц	7-излучения
163	19,5 (3) мин	Р-	1,3; 0,8	0,025; 0,235; 0,330; 0,510
164	3,0 (1) мин	г	2,9; 1,7	0,17; 0,69; 0,75
148	3,1 (1) мии	э. 3.,	—	0,620
149	4,6 (4) мин		–	0,10; 0,79; 1,78; 1,81
150	7,17 (2) мин	Э. 3., а (31)	4,23	} 0,39; 0,511 (ан.)
151	16,9 (5) мнн	Г , Г '	4,06	} 0,145; 0,511 (ан.); 0,546
152	2,38 (2) ч	Э. 3. а (0,09)	3,65	} 0,257
153	6,4 (1) ч	Э. 3. а (0,010)	3 4 ^	} 0,08**; 0,25**
154	~ ЫО' лет	а	2^85	–
155	**10,0 (3) ч**	Э. 3. (2)	1,08(0,14); 0,85(2)	\ 0,227(68); 0,52** (8); 1,000(6); ; 1,16** (6)
156	>1,0x1018 лет	0,06 (1)	–	–
157	8,1 (1) ч	Э. 3.	—	0,326 (91)
158	Стабилен	0,10 (1)	–	–
159	**144,4 (2) сут**	Э. 3.	–	0,058(4); 0,348
160	**л**	2,34 (5)	–	–
161		18,9(1)	–	–
162	1 Стабилен	25,5 (2)	–	**Z**
163		24,9 (2)		–
164	J	28,2 (2)		
165	2,334 (6) ч	г	1,29	0,095(4); 0,361 (1,1)
165т	1,26 (1) мин	и. **п.** (97,8) р- (2,2)	1,04(0,4); 0,89	} 0,108(3); 0,514(1,8)
166	81,6 (1) ч		0,48 (5); 0,40	**0,082(12); 0,372(0,5); 0,426(0,5)**
167	6,2 мин	Г	2,0; 1,8	**0,25; 0,26; 0,31; 0,57**
150	40 (5) с	Э. 3.	—	–
151	47 (2) с	**э.** 3. (90) **«(10)**	4,51	-
152	52,3 (5) с	**э.** 3. (94) «(6)	4,45	} 0,614, 0,647
153	9,3 (5) мин	Э. 3. « (0,1)	3,92	1 0,i09: 0,162: 0,366
154	**11,8 (5) мин**	**э.** 3. (>99) а (0,017)	3,93	1 0,335; 0,511 (ан.); 0,873
155	**48 (1) мин**	Э. 3.		0,092; 0,138; 0,511 (аи.)
156	**55,6 (6) мин**		2,9/1/; 1,8/18/	0,138/100/; 0,266/99/; 0,367/23/; 0,511 (ан.)
157	12,6 (6) мин		1,5; 1,2	0,087; 0,152; 0,190; 0,227; 0,341; 0,511 (ан.)
158	**11,3 (4) мин**		**2,9; 1,3**	0,099; 0,218; 0,329; 0,412;
158т	27 (2) мин	и. **п.** (65) **э.** 3. (35)	–	, 0,52; 0,647; 0,949 **0,099; 0,218; 0,356; 0,412;** J
159	33 (1) мин	**э.**	–	0,057; 0,080; 0,13; 0,253; 0,309 0,206
159т	8,30 (8) с	и. п.	–	
160	25,6 (3) мин	э. 3. (> 90) Г (-0,4)	– –	**0,73; 0,96***
160т	5,02 (5) ч	и. п. (65)		0,060; 0,197(20); 0,646(20); 0,729(50); 0,880(26); 0,965** (37)
		э. 3. + р+ (35)	1,9	0,026(23); 0,078(15)
161	2,48 (5) ч	Э. 3.	—	0,211 (53)
161т	**6,7 с**	**и. п.**	–	

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
162	15 (1) мин	з. з. (95) Г (5)	**1,10**	I 0,081 (8); 0,511 (9, ан.); 1,319
162т	68 (1) мин	и. п. **(61)** э. з. (39)		I 0,185(26); 0,940(13); 1,224(24)
163	33 (23) года			
163т	1,09 (3) с			0,299
164	29 (1) мин	з. з. (58) Г (42)		I 0,073; 0,091
164т	37.5 (10) мин	и. п.		0,037; 0,057
165	Стабилен	**100**		
166	26,80 ч		1,84	0,081 (5,4); 1.380(0,9)
166т	1,20 (18) Х Х 103 лет		0,07	0,184(90); 0,280(30); 0,711 (58); 0,810(60)
167	3.1 (1) ч		0,96: 0,3	0,06-0,53
	3,0 (1) мин		**2,2**	0,741; 0,821
	4,7 (1) мин		1,95; 1,2	0,15; 0,68; 0,84; 0,92
	42 (3) с		4,0	0,079; 0,812; 1,894; 1,973
151	23 (2) с			
152	10,1 (2) с			
153	36 (1) с			
			4,67	
154	3,75 (12) мин	а (0,5) э. з. (>99)	4,15	
155	5.3 (3) мин	э. з. (>99) а (^ 0,02)	4,012	0,110; 0,242; 0,234
156	20 мин	э. з.		0,030; 0,035
157	25 (3) мин	э. з.,		0,117; 0,386; 0,511 (ан.); 1,32
158	2,25 (7) ч			0,072; 0.250: 0,315; 0,387;
			0,8	0,51 i (ан.); 0,875
159	36 (1) мин			0,37-2.60
160	28.6 ч			
161	3,24 (4) ч	Э. з.		0,211 (9); 0,592(8); 0,826(63)
162	Стабилен	**0.14(1)**		
163	75,0 (4) мин	э. **3.** (>99) Г (0,004)	0,19	0,43(0,06); 1,10(0,04)
164	Стабилен	1,61 (I)		
165	10,36 (4) ч	э. з.		
166	Стабилен	**33,6 (2)**		
167	2,28 (3) с	**22,95 (13)**		
167га	Стабилен	н. п.		0,208 (43)
168	9,40 (2) сут	**26.8 (2)**		
169	Стабилен			0,008(0,3)
170	7,52 (3) ч	**14,9 (1)**		
171	49,3 (5) ч		1,49(2,3); 1,06	0,112(25); 0,296(28); 0,308(63)
172	1.4 (1) мин		0,89 (< 10); 0,37	0,407(40); 0,610(40)
173				0,193; 0,199; 0,895
153	1,59 (8) с		5,10	
154	3,0 (2) с		5,04	
155	39 (3) с			
156	19 (3) с		4,46	
157	3.5 (3) мин			0,110; 0,348; 0,386; 0,455
158	4.02 (10) мин			0,192; 0,335; 0,628; 1,150
159	9,0 (4) мин		**2,1**	0,038; 0,085; 0,220; 0,271; 0,289
160	9,2 (4) мин			0,126; 0,264; 0,729
161	38 (4) мин			0,084; 0,106; 0.112; 0.172-. 1,648
162	21.7 (2) мин		3,7; 2,1	0,102/20/; 0,236/10/; 0,900
162т	24,3 (17) с	и". п".'(90), э.з. (10)		0,192; 0,812
163	1,81 (6) ч	Э. з.,		0,104/8/; 0,240**/5/; 1,4

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная группп частиц	7-излучения
	2,0 (1) мин	з. 3. (50) (50)	2,94	0,091 (4); 0,511 (100, ан.); 1,155
164т	5,1 (1) мин			0,208; 0,315
165	30,06 (3) ч	и. п. (80), э. 3. (20)	0,30	0,243(50); 0,297** (35); 0,807 (15)
	7,70 (3) ч	Г (6,007)	1,94	0,081; 0,19*; 0,215; 0,46; 0,60**
167	9,24 (2) сут			0,057(4); 0,208 (43); 0,532 (2)
168	93.1 (1) сут	э! Г. (-98), р- (~2)		0,19** (77); 0,448 (27); 0,73** (40); 0,82** (88)
	Стабилен	100		
	128,6 (3) сут	Г (>99) э. 3. (0,144)		0,084 (3,3)
171	1,96 (1) года	fi-	0,097	0,067
172	63,6 (2) ч	г	1,88	0,079 (5); 0,181 (2,2); 1,((7): 1,39(7); 1,46(7); 1,53(6)
173	8,24 (8) ч	г	1,3(2); О,	0,399 (89); 0,465(8)
174	5,4 (1) мин		1,2	0,176 (67); 0,273 (85); О, 0,50(15); 0,99(89)
175	15.2 (5) мин			0,51; 0,94
176	1,9 (1) мнн			0,19; 0,38; 1,07
154	0,42 (2) с		5,33	
155	1,65 (15) с		5,21	
156	24 (1) с		4,69	
157	38.6 (10) с		4,51	0,164; 0,231
158	1,38 (14) мин	Э. 3.		0,074
159	1,75 (20) мин	Э. 3.		0,17; 0,18; 0,33; 0,39
160	4.8 мин	Э. 3.,		0,174; 0,216
161	4,2 (2) мин	Э. 3.,		0,078; 0,600; 0,631
162	18,9 (2) мин	Э. 3.		0,119; 0,163
163	11,05 (25) мин	Э. 3., г		0,064; 0,123; 0,860
164	75,8 (17) мнн	Э. 3.		
165	9.9 (3) мин		1,6	} 0,080; 0,069; 1,09
166	56.7 (1) ч	Э. 3.		0,082(17)
167	17,5 (2) мин	Э. 3.,		0,113** (90); 0,176(15)
168	Стабилен	0,13 (1)		
169	32,022 (8) сут	Э. 3.		0,063(45); 0,177 (22); 0,198(35)
169т	46 (2) с	и. п.		0,024
170		3,05 (5)		
171		14,3(2)		
172	Стабилен	21,9 (3)		
173		16,12 (18)		
174		31,8 (4)		
175	4,19 (1) сут			0,114 (1,9); 0,283 (3,7); 0,396 (6,0)
176	Стабилен	12,7(1)		
176т	11,4 (5) с	и. п.		0,19; 0,29; 0,39
177	1,9 (1) ч	р.	1,40	0,122(3); 0,151 (16), 1,080(5); 1,241 (3)
177m	6,41 (2) с			0,104(65); 0,228 (13)
178	74 (3) мин			0,348; 0,391
155	0,07 (2) с		5,63	
156	0,23 (3) с		5,54	
157	5,5 (3) с		4,996	
164	3,1 мин			0,124; 0,262; 0,740
165	12 (1) мин			0,121; 0,132; 0,174; 0,204
166	2,65 (10) мин			0,102: 0,228; 0,338
166mi	1,41 (10) мин	з. 3. (58), и. п. (42)		} 0,034; 0,102; 0,228; 0,285

Продолжение табл. 36.5

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)
166/722	2,12 (10) мин	э. З. (>80)	1,26; 1,43; 2,10
167	51.5 (10) мин	Э. З.	1 0,030: 0,278; 0,372; 0,402; / 0,511 (ан.); 1,267
	5,3 (2) мин	Г ^^ (~ 12)	} 0,087(7); 0,90(10); 0,99(13);
168т	6,7 (4) мин	Э. З.,	0,198; 0,89*; 0,979
169	34.06 (5) ч	Э. З.	} 0,063; 0,111; 0,191; 0.577
	160 (10) с		0,029
	2,00(3) сут		} 0,084(13); 0,98; 1,28; 2,04
170т	0,7 с	и. п.	
171	8,22 (3) сут		} 0,019(20); 0,668(14); 0,741(68)
171т	79 (2) с	г (-0,01)	0,071 (0,2)
172	6.70 (3) сут		0,182(26); 0,81 (21); 0,90** (45); 1,09(60)
172т	3,7 мин	и. п.	
173	1,37 (1) года	Э. З.	0,079 (14); 0,101 (7); 0,272 (18)
174	3,31 (5) года		0,076 (6); 1,24(9)
174т	142 (2) сут	и! п.'(99,3), э. З. (0,7)	I 0,067; 0,176; 0,273; 0,994
175	Стабилен	97,41 (2)	
176	3,60 (16) X X 10l« лет	2,59 (2)	0,088 (15); 0,202 (85); 0,306 (95)
176т	3,68 (1) ч		1,31 0,088; 0,126
177	6.71 (1) сут		0,497 0,113(2,8); 0,208(6,1)
177т	160,9 (3) сут	р- (78) и. п. (22)	**0,2** 0,1 1(23); 0,2 0,228 (37); 0,378 (2 0,418 (21)
178	28,4 (2) мин		**2,0** 0,089; 0,214; 0,326; 0,427
178т	22,7 (4) мин		**1,2** 0,332
179	4,59 (6) ч		1,35 0,213
180	5,7 (1) мин		2,7; 1,5 0,22; 0,41; 1,11; 1,20
157	0,110 (6) с		5,735
158	2,9 (2) с		5,27
	5,6 (5) с		5,095
	17 (2) с		4,60
	6,77 (30) мин		0,079; 0,342; 0,408
	2,05(5) мин		0,315
	25,9 мин		0,129; 0,17
	3,24 (4) мин	2) э. З.	1,7 0,115; 0,370; 0,493
170	16,01 (13) ч	э. З.	0,120; 0,165; 0,99; 1,28: 2,03; 2,36; 2,52; 2,94
171	12,1 (4) ч	Э. З.	0,122; 0,188; 0,29; 0,34; 0,47; 0,66; 0,86; 11,07
172	1,87 (3) года	Э. З.	0,024 (22); 0,082(10), 0,125** (21)
173	24,0 (5) ч	Э. З.	0,13** (96); 0,30** (52)
174	2,0 (4) X X 10l6 лет	0,162 (2)	2,50
175	70 (2) сут	Э. З.	0,089 (3,4); 0,343 (85)
176	Стабилен	5,206 (4)	
177		18,606 (3)	
177mi	1,08(6) с	и. п.	0,113 (30); 0,208 (81); 0,228 (48); 0,378 (37)
177m2	51,4 (5) мин	и. п.	0,277; 0,295; 0,327
178	Стабилен	27,297 (3)	

	Период полураспада	Тип распада и его относительная распространенность	Энергия, МэВ (относительная группа частиц	сивность, %)
178^1	4,0 с	и. п.		0,089; 0,213; 0,326; 0,426
mm^	31 (1) год	и. п.		0,217; 0,495; 0,574
179	Стабилен	**13,629 (5)**		
179ш1	18,68 (6) с	и. п.		0,217 (94)
179^2	25,1 (3) сут	и. п.		0,12; 0,15; 0,36; 0,45
180	Стабилен	**35,100 (6)**		
180т	5,5 (1) ч	и. п.		0,058 (48); 0,215(82); 0,333(93); 0,444(80)
181	42.4 (1) сут	β⁻	0,41	0,133** (48); 0,346(13); 0,482 (81)
182	9 (3)-10® лет	β⁻	0,2	0,271 (84)
182ш	61.5 (15) мин	β⁻ (54), и. п. (46)		0,224; 0,344; 0,943
183	64 (1) мин	β⁻	1,5: 1,2	0,46/58/: 0,82/100/
184	4,12 (5)4	β⁻	1,1	0,14; 0,18; 0,34
167	2,9 (15) мин	э. з.		
168	2,5(12) мин	β⁺		0,124; 0,262; 0,750
169	4,9 (4) мин	э. з., β⁺		0,029; 0,154; 0,192
170	6,76 (6) мП.1	э. з., β⁺		0,10; 0,22; 0,86; 0,99
171	23,3 (3) мин	э. з.		0,05; 0,17; 0,50*
172	36,8 (3) мин			0,092; 0,208; 0,511 (ан.); 1,109
173	3,65 (5) ч			0,090**; 0,170**; 0,64; 1,00
174	1,2(1) ч			0,091; 0,125; 0,160; 0,205; 0,280; 0,350; 0,511 (ан.)
	10,5(2) ч			0,08; 0,13; 0,21; 0,27; 0,35; 0,45; 0,60; 0,83; 1,2; 1,4; 1,7
176	8,08 (7) ч			**0,088; 0,202**
177	56,6 (1) ч			0,113 (6); 0,208 (1)
178	9,31 (3) мин	э. з. (99) **(1)**		0,093/100/; 0,511/10, ан./; 1,10/11/; 1,35**/46/
	664,9 (42) сут			
	>1,0-1013 лет	0,012 (2)		
	8,1 (1) ч	э. З. (87)	1,71	I 0,093 (4); 0,103 (0,6)
181	Стабилен			
182	115,0 (2) сут		0,71 (0,3); 0,522	0,068(42); 1,121 (34); 1.221(27)
182771	0,28 с			
182ш,	15,84 (10) мин	И. п.		0,147 (40); 0,172 (40); 0,184(20)
183	5.1 (1) сут	г	0,80; 0,62	0,108(11); 0,161** (17); 0,246** (33); 0,292(11); 0,354 (11)
184	8,7 (1) ч		2,64 (0,2); 1,76(0,9); 1,19	0,111 (21); 0,25 (42); 0,30(24); 0,41 (71); 0,90** (49)
185	49 (2) мин			0,175 (60)
186	10,5 (5) мин		**2,'6; 2,2**	0,20(74); 0,51 (33); 0,61 (33); 0,73 48)
162	<0,25 с		5,538	
163	2,5 (3) с		5,384	
164	6,3 (5) с		5,146	
165	5,1 с		4,909	
166	16 с			
170	4 (1) мин			
171	9,0 (15) мин			
172	6,7 (10) мин			0,036; 0,458; 0,624
173	16,5 (5) мин			0,050; 0,071; 0,106; 0,365
174	29 мин			0,035; 0,329; 0,429
175	34 (1) мин			0,26; 0,80; 1,3; 1,6
176	2,3(1) ч	(-0.5)		0,034; 0,100
	135 (3) мин	**э. з.**		0,20; 0,42; 0,62; 0,83; 1,00

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) Y-излучения
178	21,7 (3) сут		
179	37,5 (5) мин		0,031 (22)
179т	6,7 (3) мин	и. п. (>99), э. з. (0,31)	**0,222**
180	6-10" лет	0,13(3)	
181	121,2 (3) сут		0,006(1); 0,136(0,1); 0,152 (0,1)
182	Стабилен	26,3 (2)	
183		14,3(1)	
184	>3-101' лет	30,67 (15)	
185	75.1 (3) сут		0,429
185т	1,67 (3) мнн		0,100/16/; 0,13/70/; 0,17/100/
186	Стабилен	В,6 (2)	
187	23,9 (1) ч		1,31 (15); 0,63 0,479(23); 0,686 (27)
	69,4 (5) сут		0,349 0,227(0,22); 0,290(0,40)
	11,5 (3) мин		2,5; 2,0 0,258/100/; 0,417/96/
	30,0 (15) мин		**1,0** 0,158; 0,162
170	~ 7 с		0,156; 0,306; 0,413
172	48 (12) с		0,123; 0,254; 0,743
175	5 (1) мни		0,185
176	5,7 (8) мин		0,109; 0,241
177	14,0 (10) мин		0,080*; 0,096; 0,197
178	13.2 (2) мин		
179	19,7 (5) мин	3., *Г*	0,106; 0,237; 0,939
	2,43 (6) мин		0,29; 0,43; 1,68
			1,8 0,11; 0,511 (ан.): 0,88; 0,90
181	20(1) ч		0,365; 0,639
	64 (5) ч		0,068; 0,100; 1,122; 1,189; 1,23**; 2,0; 2,01
	70,0 (11) сут		0,046; 0,053; 0.109**; 0,209; 0,246; 0,292
184	38,0 (5) сут		0,111; 0,78**; 0,90**
184та	165 (5) сут	э. з. (25), и. п. (75)	0,22; 0,25; 0,92
185	Стабилен	37,40 (2)	
	90,64 (9) ч	Р- (92,2) з. з. (7,8)	0,137 (9); 0,632(0,03); 0,768(0,035)
186т	2,0-10® лет	и. п.	0,040; 0,059; 0,099
187	5 (2)-10"' лет	р-	0,003
		62,60 (2)	
	16,98 (2) ч		2,12 0,155(10); 0,478(0,6); 0,633(0,9)
	18,6 (1) мин		0,092(5); 0,106(10)
189	24.3 (4) ч		**1,00** 0,150* (4); 0,187* (3); 0,218* (10); 0,245 (4)
190	3.1 (3) мин		0,191/10/; 0,392/10/; 0,57/10/; 0,83/3/
190т	3.2 (2) ч	Г (51).и. п. (--49)	0,187; 0,558; 0,569
	9,8 мин		
	16(1) с		0,20; 0,29; 0,37; 0,48; 0,57
			5,57
170			5,40
171			5,24
172		э. з. (>! **а «0,3)**	5,11
	16 (5) с	э. з. (99, **а (0,02)**	4,94
	45 (5) с	э. з. (99, **а (0.02)**	4,76 0,118; 0,с

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия. МэВ (относительная интенсивность,%)	7-излучения
175	1.4 (1) мин	9. 3.		0,125; 0,181
176	3,0 (7) мин	9. 3.		0,776; 1,209; 1,291
177	3.5 (8) мин	а. 3.		0,085; 0,196
178	5,0 (4) мин	9. 3.		
179	6,5 (5) мин	Э. 3.		0,06; 0,22; 0,60; 0,97; 1,33
180	22 (3) мин	Э. 3.		**0,02**
181				0,118; 0,145
182	**li',1,",-"**	Э. 3.		0,180/7/; 0,510/10/
183	13,0 (5) ч			0,114 (27); 0,382(90)
183т	9,9 (3) ч	и. п. (11)		0,171; 1,035(6); 1,105** (48)
	>1-101' лет	0,02 (1)		
	93,6 (5) сут	Э. 3.		0,646(80); 0,875** (11)
	2 (1).1016 лет	1,58 (10)		
			2,76	
187		1,6(1)		
	Стабилен	13,3(2)		
		16,1 (3)		
189т	4.8 (1) ч	и. п.		0,031
190	Стабилен	26,4 (4)		
190т	9.9 (1) мнн			0,187(70); 0,361 (94); 0,502(98); 0,616(99)
191	15.4 (1) сут		0,143	0,129(25)
191т	13,10 (5) ч	и. п.		0,074
192	Стабилен	41,0 (3)		
	5,9 (1) с			0,20; 0,30; 0,45; 0,48; 0,57
	30.5 (4) ц		1,13	0,139(3); 0,28** (2.1); 0,460(3,9); 0,558(2,1)
194	6,0 (2) лет		0,053	0,043(10); 0,078(0,03)
195	6,5 мин		**2**	
	34,9 (2) мин		**0,8**	0,126; 0,408
169	0,4 (1) с		**6,11**	
171	1,0 (3) с		5,91	
172	1,7 (5) с		5,81	
173	3,0 (1) с		5,67	
174	4 (1) с		5,48	
175	4,5 (10) с		5,39	
176	8 (1) с		5,12	
177	21 (2) с		5,01	
178	22 (2) с	Э. 3.		0,132; 0,266; 0,363
179	4 (1) мин	Э. 3.		
180	1,5 (1) мин			0,132; 0,276
181	5 (3) мин			0,05; 0,11; 0,23; 0,32; 1,64
182	1) мин			0,133; 0,278; 0,510; 0,912
	4) мин			0,24*
	3,02 (6) ч			0,125/100/; 0,267/200/; 0,392/90/
185	14 (9) ч			0,101; 0,254; 1,67,; 1,83
186	15,8 (3) ч	9. 3. (97) Г (3)		0,137(45); 0,297(74); 0,434(35)
	10,5 (3) ч	9. 3.		0,18./45/; 0,41/10Q/,; 0,61/45/; 0,98/50/
	41,5 (5) ч	9. 3. (>99) (-0,3)	1,66	0,155 (34); 0,633* (29)
189	13,2 (1) сут '	9. 3.		0,245 (J8)
190	11,78 (J0) сут	9. 3.		0,187(51); 0,37** (39); 0,.40t*,<39); 0,518(39); 0,56*^(72); 0,604 (|i7)
190mi	1,2 ч	и. П.		0,026
190m,,	3,2 (2) ч	9. 3. (95), и. п. (5)		0,U&i
	• Стабилен.	37,3 (5)		
	4,94 (3) с			0,129;, 0,J71 I

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспа	Тип распада или относительная распространенность стабильного . %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) групп частиц	
192	73,831 (8) сут	(95,4) з. э. (4,6)	0,67	0,296(29), 0,308(30), 0,317(81); 0,468 (49)
192mi	1,45 (5) мин	и. п. (>99) fi- (0,017)	1,5	0,058(0,005); 0,317(0,008); 0,612 (0,003)
192тг	241 (9) год	и. п.		0,155
193	Стабилен	62,7 (5)		
193т	10,60 (И) сут			**0,080**
	19,15 (3) ч		2,24	0,328(10); 0,64* (1)
194т	171 (11) сут		2,3	0,13; 0,32; 0,63
195	2.5 (3) ч		1,1	0,099; 0,211
195т	3,8 (2) ч		**1,0**	0,10; 0,13; 0,33; 0,37; 0,43; **0,66**
196	52 (2) с		3,2	0,33; 0,36; 0,45; 0,78
196т	1,40 (2) ч		**1,2**	0,356(94); 0,39(95); 0,44 (95); 0,522 (99); 0,65(100)
197	5,8 (5) мин		**2,0**	0,50
198	**8 (1)с**		3,6	0,407; 0,507
	0,7 (2) с	а (~ 80) **э. 3.** +P+ (20)		
175	2,1 (2) с		5,964	0,076
176	6,33 (15) с		5,744	
	11 (2) с	э. 3. -f (58) а (9)	5,527; 5,435	
178	21,0 (7) с	э. 3. -f (91) а (7) э. 3. +P+ (93)	5,458; 5,30	
179	33 (4) с	а (0,27 э. а. (>99)	5,15	
180	52 (3) с	а 0,3) э. 3. + 3+ (> 99)	5,14	
181	51 (5) с	а (~ 0,06) э. 3. (>99)	5,02	
182	2.6 (1) мин	э. 3. (>99) а (-0,02)	4,84	I 0,136; 0,146; 0,210
	6,6 (9) мин	э. 3. (>99) а (-0,0013)	4,73	} 0,119; 0,265*; 0,307
184	17,3 (2) мин	э. 3. (>99) а (-0,001)	4,50	} 0,155; 0,192; 0,548; 0,731
185	70,9 (24) мин	Э. 3.		0,035; 0,63; 1,56
186	'2,0 (1) ч	э. **3.** (>99) а (4.10-^)	4,23	} 0,67*
187	-2,35 (3) ч ' j0,2 (3) сут	а. >99) •10^)		0,106; 0,202; 0,285; 0,709 \ 0,140/22/; 0,19**/100/; / 0,38/157
189	, 10,89 (11) ч			0,094/120/; 0,141/124/; 0,187/137/; 0,243/100/; 0,56*.ь^/230/; 0,61**/180/; 0,722/156/
190	6 (1)-10\1 лет	0,01 (1)	3,18	
191	2,9 (l)'c;V	э. 3.		0,36**-\5^.; 0,410(3); 0,539(9)
192	Стабилей	0,79 (5)		
193	50 (9) лет	з. а.		
193т	4,33 (3Гсут	и. п.		0,150
194	Стабилен	32,9(5)		
195	4,02 (.l) сут	33,8 (5)		
195т	'Стабилен '	и. п.		0,099 (11);, 0,129(1)
196	18,3 (3J ч	25,3X5).		
197	' 94,4 (8) мин	п. (9^)'	0,670'	0,077 (20);'0,191 (6)
197'т		р- (3)	0i737•	} 0,279,4^^6).; 0,346(13)

Продолжение табл. 37.1

Эле-	Л	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	Т-излучения
	198	Стабилен	7,2 (2)		
	199	30,8 (4) мин	Г	1,69	0,197(9); 0,32* (8); 0,475*(12); 0,540 (24)
	199т	13,6 (4) с	и. п.	–	0,032; 0,392
	200	12,5 (3) ч	Г	0,7; 0.6	0,08; 0,14; 0,23; 0,24
	201	2,5 (1) мин	г	2,66	0.15; 0,23; 1,76
5эАи	176	1,25 (30) с	,,	6,29; 6,26	—
	177	1,3 (4) с	а	6,15; 6,12	–
	178	2,6 (5) с	п	5,92	
	179	7,5 (4) с	а	5,84	–
	181	11,3 (7) с	« (1,1)	5,60; 5,47	–
	182	**21 (2) с**	э. 3. (>99), а (-0,04)	5,35	0,155; 0,265; 0,787; 0,855
	183	44 (2) с	а (0.3)	5,34	0,312
	184	**53,0 (14) с**	э. 3. (>99), а (0,022)	5,17; 5,11	0,163; 0,273; 0,363
	185	4,3 (1) мин	>99), а (0,09]	5,07	0,243; 0,310; 0,332
	186	10,7 (5) мин	Э. 3.	–	0,16; 0,22; 0,30; 0,40; 0,76
	187	8,0 (4) мин	Э. 3.	4,69	} 0,92; 1,33; 1,41
	188	8,84 (6) мин	Э. 3.,		0,25; 0,33; 0,63
	189	28,7 (3) мин	Э. 3.	–	0,35; 0,45; 0,71; 0,81
	189т	4,55 (10) мин	Э. 3.,	–	0,17; 0,32
	190	42,8 (10) мин	Э. 3.,		0,29**/100/; 0,60**/5/
	191	3,18 (8) ч	Э. 3., i+		0,14/10/; 0,30/60/; 0,60/10/
	191т	0,92 (11) с	и. п.		0,267
	192	**4,94 (9) ч**	Э. 3. п	2,5	1 0,137; 0,158; 0,296; 0,308; / 0,317; 0,612
	193	**17,65 (15) ч**	Э. 3.,		0,114« (5); 0,18** (11); 0,26* (9)
	193т	**3,9 (3) с**	и. п. (>99), э. 3. (0,03)	—	0,258 (65)
	194	39,5 (5) ч	э. 3. 97) 3)	1,49	1 0,294 (12); 0,328(68); 1,469
	195	183 (2) сут	Э. 3.	–	0,099(10), 0,129(1)
	195т	30,5 (2) с	и. п.	–	0,261 (77)
	196	6,183 (10) сут	э. 3. (93) В- (7\	0,26	1 0,333(25); 0,356(94), 0,426(6)
	196т, Шбтг	8,1 (2) с 9,7(1) ч	и. П. и. п.	– –	0,085 0,148 (42); 0,188(32)
	197	Стабилен	100	–	–
	197т	7,8 (1) с	и. п.		0,130(8); 0,279(75)
	198	2,696 (2) сут	Р-	0,962	0,412 (95): 0,676(1)
	198т	2,30 (4) сут	и. п.	–	0,097; 0,170-. 0,204; 0,215
	199	3,139 (7) сут	р-	0,46; 0,30	0,158(37); 0,208(8)
	200	48,4 (3) мин	ь-	2,2	0,36й;24); 1.227 (23)
	200т	**18,7 (5) ч**	Г (-84), и. п. (~ 16)	0,6	0,256; 0,368; 0,498: 0,579
	201	26 (1) мин	[i-	1,3	0,53; 0,61
	202	28 (2) с		3,5	0,44: 1,12; 1,20; 1,31
	203	53 (2) с	г	1,9	0,69
	204	40 (3) с	г	–	0,44, 1,51
eoHg	178	0,47 (14) с	а (-84). Э. 3. ^ 16)	6,43	–
	179	1,09(4) с	« 53), Э. 3. (~47)	6,288	–
	180	2,9 с	*а*	6,120	0,301; 0.381
	181	3,6 (3) с	э. 3. (74), а (26)	6,006; 5,94; 5,92	0,147
	182	11,2 (10) с	э. 3. (91), а (9)	5,87; 5,70	0.129; 0,217; 0,413
	183	8,8 (5) с	э. 3. (88), а (12)	5,905	

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительное распространение стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				Y-излучения
	30,6 (3) с	э. З. (98,7), « (1,3)		0,156; 0,236; 0,295
185	50 (2) с	э. З « 95) а О 5)	5,64	0,222; 0,258
	I,38 (10) мин	э. З. (>99), **а (0,016)**	5,09	0,125; 0,27; 0,35; 0,44
\И7	3 мин	э. З., а		0,175; 0,255; 0,40
	3,25 (15) мин	**э. З.**	4,61	0,115; 0,191
	7.6 (1) мин			0,165; 0,24; 0,32; 0,50
190	20,0 (5) мин			0,14**; 0,17
191	49 (10) мин			0,26**
191/п	50,8 (15) мин			
192	4,85 (20) ч	***I'. I'.,*** Г {< >)		0,114,30/, 0,157/20/; 0,274/100/
193	3.80 (15) ч	Э. З.		0,187; 0,574; 0,762; 0,855; 1,04; 1,08
193т	II,8 (2) ч	э. З. (92), и. п. (8)		0,141; 0,218; 0,258; 0,574
194	260 (40) лет	Э. З.		
195	9,9 (5) ч	Э. З.		0,20"; 0,261; 0,59*; 0,780; 0,930; 1,110; 1,172
195т	41,6(8) ч	э. З. **(50),** и. п. **(50)**		0,200 (35); 0,261 (20). 0,560(20)
196	Стабилен	**0,14 (10)**		
197		з. З.		0,077 (18); 0,191 (2)
197т	64,14 (5) ч	и. п. (93), э. З. (7)		0,134(42); 0,279(7)
198	23,8(1) ч	**10,02** (7)		
199	Стабилен	**16,84 (11)**		
199т	42,6 (2) мин	и. п.		0,158 (53); 0,375(15)
200		**23,13**		
201	Стабилен	**13,22**		
202		**29,80**		
203	46,60 (2) сут	р.	0,214	0,279 (81,5)
204	Стабилен	**6,85 (5)**		
205	5.2 (1) мин			0,205
206	8,15 (10) мин			0,31; 0,65
184	11 (1) с	э. З. (98), а (2)	**6,16; 5,99**	0.237; 0,340; 0,367
185т	1,8(2) с	а, И. П.	**5,97**	
	45 (3) с	з. З. (>99), а ~ (0,006)	**Б,77; 5,65**	0,36; 0,40
	3 с	и. п.		
I-87	~5 1 с	Э. З.		0,127; 0,350
187та	15,60(12) с	и. п., о	**5,53**	0,16*; 0,25
	71 (10) с	Э. З., г		0,413
	2.3 (2) мин	Э. З.		0,334; 0,942
190	3.7 (3) мин			0,416; 0,625; 0,731
191	5,22 (16) мин	**I: I:: Г-**		0,22; 0,33*: 0,511 (ан.)
192	9,6 (4) мин			0,424
193	21,6 (8) мин			0,158; 0,169; 0,178; 0,187; 0,208; 0,216; 0,247; 0,511 (ан.)
193т	2,11 (15) мин	Э. З.,		0,208; 0,345; 0,586
194	33,0 (5) мин	Э. З.		0,427
194т	32,8 (2) мин	Э. З.		0,097; 0,427; 0,636; 0,749
195	1,16(5) ч	Э. З. г	1,38	} 0,564; 0,885, 1,364
195т	3,6 (4) с	и. п.		0,383 (95)
	1,84 (3) ч	Э. З. ,		0,426; 0,611; 0,635
	1,41 (2) ч	Э. З. **,2),** и. п.		0,426; 0,635; 0,695
197	2,84 (4) ч	Э. З. .		0,152; 0,426
197т	0,54 (1) с	и. п.		0,222 (40); 0,385(90)
	5,3 (5) ч	Э. З. **0,7)**	**2,4**	\ 0,412(90); 0,65«(40); *I* 1,20(21); 1,42 (24)

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	Y-излучения
	1,87 (3) ч	э. з. (56),и. п. (44)		0,283 (30); 0,412 (45); 0,586(35); 0,635(35)
	7,42 (8) ч			0,158(5); 0,208(12); 0,247(9); 0,455 (14)
	26,1 (1) ч			
		(0,37)	1,44 (0,06); 1,07 (0,3)	0,368 (88); 0,579(10); 1,21** (35)
201	73.1 (2) ч			0,135(2); 0,167(8)
202	12,23 (2) сут	Э. з.		0,439(95); 0,522(0,1)
203	Стабилен	29,524 (9)		
204	3,78 (2) года	Р- (97,4) э. з. (2,6)	0,766	
205	Стабилен	70,476 (9)		
206	4,20 (2) мин	Р"	1,52"	
206?7	3.76 (4) мин	и. п.		0,216; 0,266; 0,453; 1,021
207	4.77 (2) мин	Р-	1,4Г	0,897 (0,16)
207т	1,33 (11) с	и. п.		0,35; 1,00
208	3.07 (2) мин		2,4Г1,80	0,583 (86); 2,614(100)
209	2,20 (7) мин		1,99	0,45 (100); 1,56(100)
210	1,30 (3) мин		2,3	0,296(80); 0,795(100)
	4.1 (3) с		6,48; 6,40	
186	7,9 (16) с		6.32	
187	17,5 (36) с		6,08	0,34*; 0,39
188	24.5 (15) с	э. з. (97), а (3)	5,98	0,185; 0,758
189	51 (3) с	э. з. (>99), а (-0,4)	5,72	0,27—1,11
190	1.2 (1) мин	э. а. (>99), « (0,2)	5,577	0,14; 0,94
191	1,33 (8) мин	э. з. (>99), а (0,013)	5,29	0,937
192	3,5 (1) мин	э. з. (>99), я (0,007)	5,06	0,17; 0,61; 1,20
193	5.8 (2) мин			0,39; 0,72; 0,94
194	11 (2) мин			0,204
195	15,8 (2) мин			0,39*; 0,71; 0,88
	37 (3) мин			0,192; 0,240; 0,253; 0,367; 0,503
197	10 (2) мин			0,375; 0,386; 0,894
197т	44.6 (9) мин	э. з. (81), и. п. (19)		0,085; 0,222; 0,234; 0,386*
	2,40 (10) ч			0,173 (28); 0,290 (16); 0,38**(40)
	90 (10) мин	Э. з.	2,8	I 0,353 (17); 0,367(80)
199т	12.2 (3) мин	и. п. (93), э. з. (7)		0,424 (20)
200	21,5 (4) ч	Э. з.		0,109; 0,146*; 0,236; 0,26**; 0,290*; 0,450
	9,4 (2) ч	Э. з.		1 0,330; 0,361; 0,406; 0,585; *I* 0,766; 0,907 ; 0,946
201т	61 с	и. п.		0,629(51)
202	~ 3-10' лет	Э. з.		
202т	3,62 (3) ч	и. п. (90,5), з. з. (9,5)		\ 0,422 (90); 0,658(35); / 0,787 (45); 0,961 (90)
203	52.1 (2) ч	Э. з.		0,279(81); 0,401 (5)
203т,	6.3 (2) с	и. п.		0,825 (70)
203т,	0,48 (2) с			
204	> 1,4-10" лет	1,4 (1)		
204т	67.2 (3) мин			0,375 (93); 0,90* (189)
205	1,43 (14) X			
206	X 10' лет	24,1 (1)		
207	Стабилен	22,1 (1)		
207т	0,805 (10) с			0,570(98); 1,064 (

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	ергия, МэВ (относительная интенсивность, %) групп частиц	
	Стабилен	**52,4 (1)**		
	3,253 (14) ч		0,635	
210	22.3 (2) года	О 99 ; (1,7-1(	0,061 3,72	0,047 (4)
211	36.1 (2) мин		1,36	0,405(3,4); 0,427(1,8); 0,832(3,4)
212	10,64 (1) **ч**		0,58	
213	10.2 (3) мин			0,239(47); 0,300(3,2)
214	26,8 мин		1,03(6); 0,67	0,242(4); 0,295 (19); 0,352
	< 1 , 5 с		6,67	
190	5.4 (5) с	а (~ 90)	6,45	
191	13 (1) с	« (~ 40)	6,32	
192	42 (5) с	а (-20)	6,06	
193	64 (4) с	« (-60	5,90	
193т	3.5 с	а 25)	6,48	
194	105 (15) с	э. З. (>99) **а « 0 , 2)**	5,61	} 0,280; 0,575; О,J
195	170 (20) с	а « 0 , 2)	5,43	
195т	90 (5) с	« (4)	**6,11**	
196	4.6 (5) мин			0,372; 0,{ 1,049
197 ***(m)***	9,5 (10) мин	а'(0И1),Э. З. (>99)		
198	11,85 (18) мин			0,20; 0,32; 0,56, 1,06
	7.7 (5) с	**и. п.**		0,248
199	27 (1) мин	э. З. (>99) а (-0,01)	5,53	} 0,425; 0,837; 0,842; 0,946
	24,70 (15) мин		5,484	
200	36.4 (5) мин	Э. З.		0,245; 0,420; 0,462; 1,027
200т	31 (2) мин	Э. З. ,		0,420; 0,462; 1,027
201	108 (3) мин	Э. З.		0,629; 0,786; 0,936; 1,014
201т	~ 60 мин	**Э. З. , и. п.** а о 0,02)	5,28	
	I,72 (5) ч	э. З.,		0,422; 0,961
203	II,76(5) ч		1.35	0,82** (78); 1,52** (31); 1,87* (35)
204	11,22 (10) ч			0,21**; 0,375; 0,671; 0,91**; 0,98; 1,21**
205	15,31 (4) сут	Э. З. **(0,06)**	0,98	0,703(28); 0,988(17); 1,766(27) 0,516(46); 0,538(34);
206	6,243 (3) сут	Э. З.,		0,803(99); 0,880(72)
207	38 (3) лет			0,570(98); 1,064 (77); 1,770
208	3.68 (4)-1№ лет			2,614(100)
209	Стабилен	100		
210	5,013 (5) сут	р- (>99) а(1,3.10-«)	**1,160** 4,69: 4,65	
	3,0(1). 10® лет	а (99,6) Г (0,4)	4,96 (58); 4,92(36); 4,57(6)	0,262 (45); 0,30(23); 0,34; 0,61
211	2,14 (2) мин	а (99,72) **Р- (0,28)**	6,62 (84); 6,28(16)	0,351(14)
212	60,55 (6) мин	Г (64) а (36)	2,25 6,09(10); 6,05(26)	0,04(2); 0,288(0,5); 0,46** (0,8); 0,727(7); 0,785 (1,1); 1,620(1,8)
212mi	25 мин	а (< 93), р- (> 7)		
212m2	9 мин	р- « 100)		
213	45,59 (6) мин	Р- (97,8) а (2,2)	1,39 5,87	0,437
214	19,9 (4) мин	Р- О 99) **а (0,021)**	3,26 5,45 (0,012); 5,51 (0,008)	0,609(47); 0,769(5); 1,120 (17); 1,238(6); 1,378 (5); 1,40** (4); 1,764 (17); 2,204 (5); 2,445 (2)
215	7 мин			

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная интенсш	
192	0,034 (3) с		7,18	
193	0,45 (15) с		6,94	
194	0,6(2) с			
195	4.5 (5) с		б^бОЭ	
195 (т)	2,0 (2) с		6,699	
196	5,5(5) с		6,520	
197	56 (3) с	(90)	6,281	
197т	26 (2) с		6,385	
	1,76 (3) мин	(70)	6,183	
		(30)		
199	5,2 (1) мин	**э. з.** (88) **а** (12)	5,952	0,362; 1,021; 1,034
199т	4,2 (1) мин	Э. 3. (61) *а (39)*	6,059	0,500; 1,002
200	11,5 (1) мин	э. 3. (86) а (14)	5,863	0,434; 0,671; 0,797
201	15,3 (2) мин	э. 3. (98,4) а (1,6)	5,683	0,890; 0,905
201т	8,9 (2) мин	и. п. (40), э. 3. (57) а (2,9)	5,786	0,412; 0,967
202	44,7 (5) мин	э. 3. (98) а (2)	5,587	0,166; 0,316; 0,689; 0,717; 0,791
203	36,7 (5) мин	э. 3. (~ 100) « (0,11)	5,384	0,215; 0,894; 0,909; 1,091
203т	1,2 (2) мин	и. п. (96), э. (4)		0,262; 0,577; 0,905
204	3,53 (2) ч	э. 3. (>99) **« (0,6)**	5,377	0,270; 0,884; 1,016
205	1,80 (4) ч	э. **3.** (>99) « (0,5)	5,22	0,837; 0,850; 0,872; 1,001
206	8,8 (1) сут	э. **3.** (94,5) « (5,5)	5,223	0,286/35/; 0,338/40/; 0,51"/100/; 0,807/60/; 1,02**/85/ 0,25/5/; 0,35/4/; 0,41/13/; 0,74/36/;
	350 (4) мин	99) **а'(0,'с**	5,116	0,95/84/; 1,15/6/; 1,37/4/; 2,06/1,6/
207т	2,8 (2) с	и. п.		0,26(42); 0,31 (40); 0,82(100)
208	2,898 (2) года	**а О 99)** э. 3. (0,0018)	5,115	0,285 (0,003); 0,60** (0,006)
209	102 (5) года	**а (99,74)** э. 3. (0,26)		0,261** (0,4); 0,91 (0,5) 0,803 (0,0011)
210	138,376 (2) сут		5,305(100)	0,570 (0,5); 0,90(0,5)
211	0,516 (3) с		7,45 (99)	0,570(92); 1,063(77)
211т	25,2 (6) с		8,88(7); 7,28(91)	
212	2,98 (3)-10-' с		8,78(100)	
212т	45,1 (6) с		11,65 (97)	0,57(2); 2,61 (2,6)
213	4,2 (8). 10-" с		8,38	
214	1,64 (2)-10-« с		7,69 (100)	
215	1,780 (4) X X 10-3 с	а О 99) р- (0,00023)	7,38(100)	
216	0,15 (1) с		6,78(100)	
217	< 10 с		6,55	
218	3,05 мин	**« О 99)** р- (0,018)	6,00(100)	
196	0,3 (1) с		7,06	
197	0,4 (1) с		6,959	

Продолжение табл. 37.1

Элемент	л	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	Y-излучения
	198	4,9 (5) с		6,755	
	198т	1,5 (3) с		6,849	
	199	7,0 (1) с		6,643	
	200	43 (2) с	" (53) э. з. (47)	6,47; 6,42	
	201	89 (3) с	«(71) э. з. (29)	6,344	
	202	181 (3) с	э. з. (85) а (15)	6,23(4,3): 6,12(8)	1 0,441; 0,570; 0,675
	203	7,37 (20) мин	э. з. (69) « (31)	6,088	1 0,639; 1,002; 1,034
	204	9,2(2) мин	э. з. (95,6) «(4,4)	5,951	1 0,425; 0,515; 0,683
	205	26,2 (5) мин	э. з. (90) а (10)	5,902	} 0,629; 0,669; 0,719
	206	29,4 (3) мин	э. з. (99) «(1)	5,703	1 0,068(10), 0,396; 0,477; 0,701
	207	1,80 (4) ч	э. з. (-90) а (~ 10)	5,759	
	208	1,63 (3) ч	э. з. (99,4) « (0,6)	5,6Г	} 0,18(25); 0,25; 0,66(100)
	209	5,41 (5) ч	э. з. (95,9) « (4,1)	5,647	} 0,195 (23); 0,545 (62); 0,780 (94)
	210	8,1 (4) ч	э. з. (99.82) а (0,18)	5,52 (0,05); 5,44 (0,05); 5,36 (0,06)	) 0,245 (79); 1,180 (100); 1,436 (29); 1,483 (48); 1 1,599(14)
	2П	7,214 (7) ч		**5,868**	1 0,67
	212	0,314 (2) с		**7,66(80); 7,60 (20)**	0,063
	212т	0,119 (3) с	*а*	**7,88 (20); 7,Ь2 (80)**	0,063
	213	1,1 (2)-10-7 с		**9,08**	
	214	2-10-« с		**8,78 (99)**	
	215	Ы0-« с		**8,026**	
	216	3-10-> с			
	217	0,0323 (4) с	**" О 99)**	**7,80j97); 7,70**	
	218	^ 2 с			
	219	0,9 (1) мии	**Г (0,1)** **5-ГЛ!**	**6,70 (94);.6,65 (6)** **6,21**	
«Rn	200	1.0(2) с	*а*	6,91	
	201	7,0 (4) с		6,72	
	202	9,85 (20) с	« О 70)	6,64	
	203	45 (3) с	а (65) э. з. (35)	6,498	
	203т	28 (2) с		6,548	
	204	1,24 (3) мин	а (~ 72) э. з. (-28)	6,417	
	205	2,83 мин	э. з. (77) « (23)	6,263	1 0,265; 0,465; 0,620
	206	5,67 (17) мин	а (64) э. з. (36)	6,260	} 0,325; 0,387; 0,498
	207	9,3 (2) мин	э. з. (77) а (23)	6,133	} 0,345; 0,747
	208	24,35 (13) мин	а (52) э. з. (48)	6,141	1 0,251; 0,287; 0,350; 0,952

Продолжение табл. 37.1

Эле-	*A*	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	7-излучения
	209	28,5 (10) мин	э. з. (83) « (17)	6,039	1 0,338; 0,408; 0,689; 0,746
	210	2,4 (1) W	а (96) э. з. (4)	6,040	} 0,458
	211	14,6 (2) ч	**э. з. (74)** **а (26)**	– 5.85(9); 5,78(17)	0,445(29); 0,680 (74); 0.865(18); 0,946(21); 1,13(23); 1,37 (38)
	212	24 (2) мин	*а*	6,264	
	213	**0,025 (2) с**		8,09	
	214	**2,7 (2)-10-' с**	а	9,04	
	215	2,30(10)-10-''с	а	8,67	
	216	4,5 (5)-10-6 с	*а*	8,05	
	217	5,4(5)-10-« с	*а*	7,740	
	218	0,035 (5) с	*а*	7,14(99,8)	0,609 (0,2)
	219	3,96 (1) с	"	6,82 (81): 6,55(11); 6,42(8)	0,272(9); 0,401 (5)
	220	55,6 (1) с	а	6,29(100)	0,55 (0,07)
	221	25 (2) мин	р- (~ 80) а (~ 20)	1,1; 0,8 6,037; 5,788; 5,778	1 **0,150; 0,186**
	222	3,8235 (3) сут	*а*	5,49(100)	0,510(0,07)
	223	43 (5) мин	*Г*	–	–
	224	107 (3) мин	*г*		0,261; 0,266
	225	4,5 (3) мин	*г*	–	
	226	6,0 (5) мин	р-	–	–
,Fr	202	0,34 (4) с	,,	7,251	
	203	0,7 (3) с	*а*	7,132	
	204	2,1 (2) с	*а*	7,028; 6,970	
	205	3,7 (1) с	*а*	6,916	
	206	16,0 (1) с	**а (85)** **э. з. (15)**	6,790	} 0,559; 0,575; 0,629
	207	14,8 (1) с	**« (93)** **э. з. (7)**	6,767	.
	208	59,0 (20) с	а (74) э. з. (26)	6,636	} 0,325; 0,636; 0,779
	209	50,0 (3) с	а (89) э. з. (11)	6,648	
	210	3,18 (6) мин	Э. з.	6,543	1 0,644; 0,817
	211	3,10 (2) мин	а, э. з.	6,535	0,281; 0,540; 0,918
	212	**20,0 (6) мин**	э. з. (56) « (44)	– 6,42(16); 6,39(17); 6,35(11)	) 0,227; 1,185; 1,274
	213	**34.6 (3) с**	« (99,45) э. з. (0,55)	6,775	–
	214	**0,005 (2) с**		8,426; 8,356	–
	214т	**0,00335 (5) с**	а	8,547; 8,477	
	215	**9 (1)-10-8 с**	я	9,36	
	216	70 (2). 10-8 с	*а*	9,01	
	217	22 (5). 10-" с	*а*	8,315	
	218	7 (6)-10-^ с	*а*	7,85 (93); 7,5Г	
	219	0,021 (1) с	*а*	7,313	
	220	27,4 (3) с	*а* (99,65) р- (0,35)	6,68(85); 6,64(13)	} 0,045; 0,106; 0,162
	221	4,9 (2) мин		**6,34 (82); 6,12(15)**	0,218 (14)
	222	14,4 (4) мин	Г О 99) а (0,01-0,1)	**1,8**	—
	223	21,8 (4) мин	Г (1 > о а)	1,15 5,34	} 0,050 (40); 0,080 (13); 0,234 (4)
	224	2,67 (20) мин	Р-	2,8; 2,6	0,132; 0,216; 0,837; 1,341
	225	3,9 (2) мин	Г	1.6	–

л	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная групп частиц	
226	48 (1) с	Г	3,5; 3,2	0,186; 0,254; 1,323
227	2,4 (2) мин	t	2,4; 1,8	0,090; 0,586
228	39 (1) с			0,474
229	50 (20) с	р-		0,310
206	0,4 (2) с	,,	7,272	
207	1,3(2) с	*а*	7,133	
208	1,3 (2) с	*а*	7,13	
209	4,6 (2) с	*а*	7,010	
210	3,7 (2) с	*а*	7,019	
211	13 (2) с	*а*	6,911	
212	13,0 (2) с	*а*	6,9001	
213	2,74 (6) мин	а (80), э. З. (20)	6,73; 6,62	0,110; 0,215
214	2,46 (3) с	«(>99), э. З. (0 059)	7,136	
215	1,59 (9)-10-3 с	*а*		
216	1,82 (10)-10-'с		9,349	
217	1,6(2). 10-е с	*а*		
218	1,4 (2)-10-6 с	*а*		
219	0,01 (3) е	*а*	7,98; 7,68	
220	0,023 (5) с	*а*	7,46 (99)	0,465 (1)
221	28 (2) с	«	6,76 (30); 6,67 (20); 6,61 (34); 6,59 (8)	0,091 (3,5); 0,151 (13); 0,175(2)
222	38,0 (5) с	*а*	6.56 (96); 6,23	
223	11,434(2) сут		5,75(9); 5,71 (54); 5,61 (26); 5,54(9)	0,325 (4) 0,149** (10); 0,270 (10);
224	3,66 (4) сут	,,	5,68 (94); 5,45 (6)	0,33** (6)
225	14,8 (2) сут	Г	0,36	0,241 (3,7)
226	1600 (7) лет	*а*	4,78 (95); 4,60(6)	0,040 (33)
227	42,2 (5) мин	***К***	1,31	0,186 (4)
228	5,75 (3) года	i-	0,04	0,291 (4); 0,498 (0,6)
229	4,0 (2) мин		1,8	
230	93 (2) мин	р-	**0,8**	0,063; 0,072; 0,203; 0,470
209	0,10 (5) с	*а*	7,59	
211	0,25 (5) с	*а*	7,48	
212	0,93 (5) с	*а*	7,38	
213	0,80 (5) с	*а*	7,36	
214	**8,2 (2) с**	а (>86), э. З. « 14)	7,214; 7,082	
215	0,17 (1) с	а (99,91), э. З. (0,09)	7,604	
216	~ 3,3-10-^ с	*а*	9,07; 8,99	
217	1,П(3)-10-' с	*а*	9.65	
218	2,7 (4). 10-' с	*а*	9,21	
219	7 (2)-10-8 с	*а*	8.66	
220	2,61 (5)-10-2 с	*а*	7,85; 7,68; 7,61	
221	0,052 (2) с	*а*	7,65; 7,44; 7,38	
222	4,2 (5) с	*а*	7,013 (93); 6,967	
223	2,2 (1) мин	*а* 99)	6,66 (38); 6,65 (42); 6.57 (13)	
		Э. З. (1)		0,082 (0,2); 0,096 (0,2)
224	2,9 (2) ч	а (~ 10)	6,20(3); 6,14(3); 6.04_(3)	0,132 (28); 0,217 (62)
, 225	10,0 (1) сут	э. З. (-90)	5,83 (54); 5,79 (28);	0,099; 0,150; 0,187
226	29 ч	*а* Г (83) э. З. (17); а (0,006)	5,73* (10) 1,1; 0,9	0,158 (32); 0,185 (9); 0,230 (47); 0,253 (11)
227	**21,773 (3) года**	Г (98,62) «(1,38)	0,046 4,95* (1,2); 4,{ **(0,18)**	0,070; 0,166; 0,190

Продолжение табл. 37.1

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
	6,13 ч		2,1; 1,2	0,34** (15); 0,908 (25); 0,96** (20)
229	62,7 (5) мин		**1,1**	0,14*; 0,16; 0,26; 0,57
230	122 (3) с		2,7	0,455; 0,508; 1,244
231	7,5 (1) мин		**2,1**	0,185; 0,28; 0.39; 0.71
232	35 (5) с			
213	0,150 (25) с		7,69	
214	0,125 (25) с		7.68	
215			7;52; 7,39	
216	о!028^2) с		7,92	
217	2,52 (7)-10-^с		9,25	
218	1,09 (13)-10-' с		9,67	
219	1,05 (3)-10-ч с		9,34	
220	9,7 (6)-10-" с		8.79	
221	1,68 (6). 10-е с		8,47; 8,15	
222	2,8(3)-10-" с		7,98	
223	0,66(1) с		7,32; 7,29	
224	1,04 (5) с		7,18 (79); 6,91 (19)	0,177 (9); 0,235 (0,4); 0,297 (0,3); 0,410 (0,8)
	8,0 (5) мин	(-90)	6.80 (8); 6,75 (6); 6,50 (12); 6,48 (39): 6,44 (13)	0,246 (5); 0,322 (27); 0,362 (5); 0,45 (1); 0,49 (1)
		э. 3. 10)		
226	30,9 мин		6,34 (79); 6,22 (19)	0,111 (3,4); 0,242 (1,2)
227	18,718 (5) сут		6.04 (23); 5,98 (24); 5,76(21); 5.72* (14)	0,050(8); 0.237** (15); 0,31**^8)
228	1,91313(88) лет		5,42 (73); 5,34 (27)	0,084 (1,6); 0,132 (0,2); 0,167(0,1); 0,214(0,3); 0,239
229	7340 (160) лет		5.05 (5); 4,97« (9); 4,90 00); 4,84 (56); 4.81 (9)	0,137** (~3); 0,20* (~ 10)
	7,538 (30) **X** **X** 10« лет		4.69 (76), 4,62 (24)	0,068 (0,6); 0,142 (0,07)
231	25,52 (I) ч		0,40; 0,30	0,026 (2); 0,084** (10)
232	14,05 (6)-10i'лет		4,01 (77); 3,95 (23)	
	22,3 (П мин		1,23	0,029 (2.1); 0,087 (2,7); 0,171 (0,7); 0,453 (1)
234	24,10 (3) сут			0,063* (3,5); 0,093* (4)
235	6,9 (2) мин			0,416—0,932
236	37,1 (15) мин		**1,1; 1.0**	**0,11**
216	0,20 (4) с		7,87; 7,81	
217	4,9 (6)-10-3 с		8,33	
222	5.7 (5)-10-3 с		8,54; 8,33; 8,21	
223	6,3 (10)-10-3 с		8,20; 8,01	
224	0,95 (15) с		7,49	
225	1.8 (3) с		7,25; 7,20	
226	1,8 (2) мин	0.(74)	6,86 (38); 6,82 (34)	
	38,3 (3) мин		6,47 (43); 6,42** (23); 6,40(8); 6,36 (7)	0,065** (6); 0,110(2)
		э. 3. (~ 15)		
	22(1) ч	э. 3. (-98)	6,11* (1);6,08 (0,4); 6,03 (0,2); 5,80 (0,2)	0,14(3); 0,20(9); 0,28(5); 0,33(18); 0,41 (13); 0,46(32); 0,95(93); 1,57(7); 1,85(4)***
	1,4(4) сут	э. **3.** (99,75) с (0,25)	5,67 (0,05); 5,62** (0,07); 5,58 (0,10); 5,54 (0,03)	

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) групп частиц	
230	17,4 (5) сут	э. з. (90) р- (10) « (0,0032)	0,41 5,34; 5,32; 5,30	0,45** (18); 0,91** (24); 0,95 (50)
231	32760(110) лет		5,06(11); 5,03 (20); 5,01 (25); 4,95 (23); 4,73(11)	0,027 (6); 0,29** (6)
232	1,31 (2) сут		1.3 (0,7); 0,32	0.150(12); 0,87** (51); 0,97(40)
233	27.0 (1) сут		0.568 (5); 0,257	0.31** (44); 0,34' ' ' ^ '
234	6,70 (5) ч		1.3 (< 2); 1,13 (13); 0,53	0.100 (50); 0,126 (26); 0,70 (24); 0,90 (70)***
	1,17 (3) мин	р- (99,87) и. п. (0,13)	2,29	0,765 (0,30); 1,001 (0,60) 0,128—0,659
235	24.1 (2) мин		1.4	0,64; 0,69; 1,76
236	9,1 (2) мин		3,3	0,090/50/; 0,145/45/;
237	8,7 (2) мин		2,3	0,205/55/; 0,330/40/; 0,46/100/, 0,75/50/; 0.87/100/; 0,92/100/
226	0,5 (2) с		7,43	
227	1,1 (3) мин		6,87	
	9.1 (2) мин	а О 95)	6,69/70/; 6,60/29/	0,152 (0,2); 0,187 (О,с 0,246 (0,4)
229	58 (3) мин	**э. з.** (-80) а (~ 20)		
230	20,8 сут		6,36 (13); 6,33 (4); 6,30 (3)	
		э. з. (>99)	5,89 (67); 5,82 (32)	0,072 (0,54); 0,231 (0,18)
231	4,2 (1) сут	а (0.0055)	5,46	} 0,084 (7); 0,218 (1)
232	68,9 (4) года		5.32 (69): 5,26 (31)	} 0,058 (0,21); 0,129 (0,082)
		с. д. (0,9-10-10)		
233	1,592 (2) Х Х 10⁸ лет	*а*	4,82 (84); 4.78 (13), 4,7 3 (1,5)	0,029/60/; 0,042/310/; 0,055/68/; 0,097/100/; 0,164/27/; 0.32*/43/
		с. д. (1,3-10-**w**)		
234	2,45 (2) Х Х 10⁸ лет	с. д. (1,7-10-s)	4,77 (72); 4,72 (28)	0,053 (0,2)
		0,0055 (5)		
235	7,038 (5) Х Х 10⁸ лет	0,7200 (12)	4,58* (8); 4.40(62); 4,36(18); 4,22 (6)	0,143 (И); 0,185 (54); 0,204 (5)
		с. д. (7,2-10-»)		
235m	26,1 мин	и. п.		
236	2,3416 (39) Х Х 10' лет		4,49 (74), 4,44 (26)	
		с. д. (9,6-10-»)		
	6,75 (1) сут		0,248"	0,026 (2); 0,060 (36); 0,165 (2); 0,208 (23)
	4,468 (3) Х Х 10" лет	99,2745 (15)	4,20 (77); 4,15 (23)	
		с. д. (5,4.10-'i)		
239	23,50 (5) мин		1,29	0,044 (4); 0,075 (51)
asNp 240	14.1 (2) ч		0,36	0,044
227	1,1 (3) мин			
229	4,0 (2) мин			
230	4,6 (3) мин	а (>99), э. з. (<0,97)		
231	48,8 (2) мин	э. з. (<99), « О 1)	6,29	0,264; 0,348; 0,371
232	14,7 (3) мин	Э. з.		0,28; 0,33; 0,82; 0,86*'
233	36.2 (1) мин	э.з. (>99), а (~ 0,001)	5,54	

A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа. %	Энергия, МэВ групп частиц	
234	4,4 (1) сут	Э. З. (-0,05)	0.8	**0,109; 0,23; 0,25; 0,45: 0,50; 0,75; 0,95; 1,21; 1,56*** **
235	396,2 (12) сут	э. З. (>99) *а* (0,0016)	5,02; 5,00	
236	1,15 (12) X X 10^ лет	э. З. (91)		**0,104; 0,160**
237	2,14 (1) X X Ю® лет	Г (^)	4,79 (51); 4,77 (25) 4,65* (9)	**0,030 (14); 0,086 (14); 0,145(1)**
238	2,117 (2) сут	Р-	1,25	**1,0И* (42)**
239	2,355 (4) сут	Г	0,713 (11); 0,437	**О ,106 (23); 0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)**
240	65 (3) мин	Р-	0,89	**0,16; 0,25; 0,44; 0,56; 0,60; 0,92; 1,00; 1,16**
240т	7,4 (2) мин	Г	2,16	**0,56 (21); 0,60 (13); 0,92** (3);**
241	16,0 (2) мин		1,3	**o'133;^ o1174**
232	34,1 (7) мин	э. З. (>80) а « 20)	6,59; 6.54	
233	20,9 (4) мин	э. З. 100) - а (0,12)	6,31	I 0,235; 0,535
234	8,8 (1) ч	э. З. (94) а (6)	6,20 (4); 6,15 (1,9)	
235	25,3 (10) мин	э. З. (>99) а (0,003)	5,86	
236	2,851 (8) года	к	5,77 (69); 5,72 (31)	**0,048 (0,31); 0,109(0,012)**
237	45,3 (2) сут	э. З. (>99) а (0,0033)	5,66/21/; 5,37/79/	0,060 (5)
237/я	0,18 с	и. п.		0,145 (2)
238	67,74 (4) года	*а*	5,50 (72); 5,46 (28)	0,099 (8-10-3); 0,150(1-10-3)
239	24119 (26) лет	с. д. (1,84.10-')	5,15* (88); 5,10(11,5)	**0,039 (0,007); 0,052(0,020); 0,129 (0,005); 0,375(0,0012); 0,414 (0,0012)**
240	6537 (10) лет	с. д. (4,4-10-») а С. д. (5,7-10-8)	5,17 (76); 5,12 (24)	**0,65** (2-10-5)**
241	14,4 (2) года	а (2,4-10-3)	4,90 (0,0019); 4,85 (0,0003)	
242	3,763 (20) X X 10® лет	р- О 99)	0,021 **4,90 (74); 4,86 (26)**	**0,145 (1,6-10-«)**
243	4,956 (3) ч	с. д. (5,5-10-«)	0,58	**0,084 (21); 0,381 (0,7)**
244	8,08 (10) X X 10' лет	Г	4,59; 4,55	
245	10,5 (1) ч	с. д. (1,25-10-1)	1,2; 0,9	**0,33; 0,56**
246	10,85 (2) сут		0,33 (10); 0,15	**0,044 (30); 0,180 (10); 0,224 (25)**
232	55 (7) с			
234	2,6 (2) мин	Э. З., с. д.		
237	**73,0 (10) мин**	э. З. (>99) а (0,025)	6,04	} **0,280; 0,438; 0,474; 0,909 •**
238	**98 (2) мин**	э. З. (>99) „(ЫО-'')	5,94	**I 0,36 (Щ; 0,58(29); 0,98* (80);**
239	11,9 (1) ч	э. З. (>99) а (0,01)	5,78	**I 0,209 (5); 0,228* (18). 0,278 (17)**
240	50.8 (3) ч	э. З. (>99) **а (1,9-10-«)**	5,378	} **0,90 (23); 1,00 (77)**
241	432,2 (5) года		5,49 (85); 5,44 (13)	**0,026 (2,5); 0,060 (36); 0,101** (0,04)**

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного J. %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
242	16,02 (2) ч		0,67	
242т	152 (7) года	г f i P 7 , 3 , . "(„ " . « Г ' ® '	5,21 (0,41)	0,049 (0,20); 0,087 (0,036)
243	7380 (40) лет	С. д. (1,6-10-8)	5,28(88); 5,23 (11)	0,044 (4); 0.075 (50)
244	10,1 (1) ч	С. Д. (2,2-10-8)	0,38Г	0,099 (5); 0,154 (19); 0,746 (66); 0,900 (25)
244/71	~ 26 мин	г о ^9) э. 3. (0,036)	1,50	
245	2,05 (1) ч		0,91	0,253
246	39 (3) мин			0,799 (29); 1,07** (65)
247	22 (3) мин			0,23; 0,28
	2,4 (1) ч	^ i / o T » » '	2,10 (7); 1,60	
	~2 , 9 ч	э. 3.		**0,188**
240	27 (1) сут		6,52	
241	32,8 (2) сут	э. 3. (99) «(1)		} 0,475 (95); 0,60
242	162,8 (4) сут			0,044 (0,041); 0,102 (4.10~з)
		с. д. (6,8.10-«)	6,29 (72); 6,25 (28)	
243	28,5 (2) года	а (99,76)	**6.06** * (6): 5,99* (6); 5,78 (73); 5,74(11)	0,209 (4); 0.228 (12); 0.278 (14)
244	18,10(2) года	9. 3. (0.26)	6,11 (74); 6,07 (26) 5,80 (77); 5,76 (23)	0.043(0.02); 0.100(0.0015); 0.150(0.0013)
245	8500 (100) лет	с. д. (1,3-10-*)	5,36 91); 5.31 (6)	0.13 (5); 0.173(14)
246	4730 (100) лет		5,39 79); 5.34 (21)	
247	1,56 (5) X X 10' лет	с. д. (2.6-10-2)	5,27; 4,87	0.278; 0.402
248	3,40 (4) X X 105 лет	а а (91.74)	5,08 (82); 5.04 (18)	
249	64,15 (3) мин	р- д. (8,26)		
250	~ 7400 лет	с. д. (-65), а (-28), р- (-7)	1,4	0,39; 0,44; 0,53; 0,54
	16,8 (2) мин			
242	7 мин	Э. 3.		
243	4,5 (2) ч	э. 3. (99.85) а (0,15)	6,76 (0.023); 6.72 (0,019); 6,57 (0.038); 6.54 (0,029); 6.21 (0.020)	0,755; 0,84; 0,946
244	,35 (15) ч	э. 3. (>1 а (0,006)	6.67 (0,003); **6.62** (0,003)	0,218 (100); 0,892 (88)
245	,94 (3) сут	**э. 3.** а (0.15	6,367О,018); 6,32 (0,017); 6,15 **(0,021);** 6,12 (0.016); (0.024)	0,253 (31); 0,39* (3)
246	1,80 (2) сут			0,800 (40); 1,07** (12)
247	1380 (250) лет		5.69 (37); 5,53 (58)	0,084 (40); 0,27 (30)
248	23,7 (2) ч	В- (70) L L (30)	0,9	0,551

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного	Энергия. МэВ (относительная интенси! ь, %)	
	320 (6) сут		0,125	} 0,32* (3-Ю-в)
		а (о^о^\^5)	5,42 (0,0015); 5,39	
		с. д. (4,7-10-8)		0,990 (47); 1,0
250	3.217 (5) ч		1,76 (11); 0,73	0,153; 0,178
251	56 (2) мин			
240	1.06 (15) мин		7,59	
241	3,78 (70) мин		7,342	
242	3,68 (44) мин		7,392; 7,358	
243	10,7 (5) мин	:~8б)		
			7.17; 7,06	
244	19.4 (6) мин		7,213; 7,176	
245	43.6 (8) мин		7,137	
			6,76 (78); 6,72 (22)	
246	35.7 (5) ч			
247	3,11 (3) ч		6,301	0,295 (1); 0,417; 0,460
		а		
248	333,5 (28) сут	с. Д.	6,27 (82); 6,22 (18)	
249	351 (2) год	С. д. (5,2-10-')	5,81 (84); 5,76 (4)	0,333 (16); 0,388 (72)
250	13.08 (9) года	с. д. (7,7-10-")	6.03 (85): 5.99 (15)	
251	898 (44) лет		5.85 (45); 5.67 (55)	0,18; 0,23
	2,638 (10) года	а (96,91)	6.12 (84); 6,08 (16)	
		С. д. (3,09)		
252	17,81 (8) сут	р- (99,69)	0,27	
		а (0,31)	5,98	
253	60.5 (2) сут	С. д. (99.69)		
		а (0,31)	5.834	
254	1,9 (6) ч			
255	12,3 (12) мин	С. д.		
256				
243	21 (2) с	э.	7.89	
244	37 (4) с	Э. 3. :(4)	7,57	
245	1,33 (15) мин	Э. 3.		
		а (40)	7,73	
246	7.7 (5) мин	э. 3. (90)		
		а (10)	7,36	
247	4.7 (3) мин	э. 3. (-93)		
			7,31	
248	27 (3) мин			
		а (0,3)	6,87	
249	102,2 (6) мин	э. 3. (99.4)		0,38*; 0,81
		а (0,6)	6.77~	
250	8,6 (1) ч			0,303; 0,349; 0,829
251	33(1) ч	*I'. з'.* (99,5)		0,178
		а (0,5)	6,49; 6,46	
252	471,7 (19) сут	а (78)	6,64 (82); 6,58 (13)	0,228 (0,23); 0,278 (0,21); 0,40** (1,1)
		э. 3. (22)		0,387** (0,05)
253	20,47 (3) сут		6,63 (90)	
		С. д. (8,7-10-8)		
254	275,7 (5) сут		6,43 (93)	0,063(2); 0,27** (12); 0,31* (0.22)
254т	39,3 (2) ч		1,13 (25); 0.43	
		г Ь г	6.382'	0,65 (31); 0,69** (38)
255	39.8 (12) сут			
		а (8)	6,30; 6,26	
		С. д, (0,004)		

	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного I. %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
256	7,6 ч			0,22; 0.23; O.f
243	0,18 (6) с		8.55	
244	0,0037 (4) с	с. д.		
245	4.2 (13) с		8,15	
246	**1.1 (2) с**	**" (92)**	8,24	
		с. Д. (8)		
247	35 (4) с	а (> 50)	7,93; 7.87	
		э. з. (<50)		
248	36 (3) с	**а (99,9)**	7,87? 7,83	
		с. Д. (0,1)		
249	2.6 (7) мин		7,53	
250	30 (3) мин		7,43	
251	5,30 (8) ч	(98,2)		
		;(1,8)	6,83; 6,78	} 0,453; 0.881
252	25.39 (5) ч	д.		
			7,04; 7,00	
253	3,00 (12) сут			} 0.145; 0.272
		; (12)	6,94)- 6,67 (2)	
254	3,240 (2) ч	**: О 99)**	7,20 I 2); 7,16 (17)	
		:. д. (0.059]		
255	20,07 (7) ч		7,02 (93); 6,96	0,059* (0.9); 0,081* (1; 1)
256	157,6(13) мин	**: t (91,9)**		
		;(8,1)	6,917	
257	100,5 (2) сут	**; (99,79)**	6,52 (94)	0,180 (8); 0,242 (10)
		. Д. (0,21)		
258	0,000380 (60) с	**. Д.**		
259	1,5(3) с			
248		. з. (80), а (20)	8,36; 8.32	
249	24%'с	.. з. «80),		
		; (> 20)	8,03	
	52 (6) с		7,82; 7,75	
	4.0 (5) мин			
		; (< 10)	**7,55**	
	2.3 (8) мин	i. 3.		
254	10 (3) мин	l. з.		
255	27 (2) мин	з. (92)		0.430
		:(8)	7,326	
256	76 (4) мин	i. 3. (90,1)		0.400
		(9,9)	7,20^7,138	
257	5.2 (5) ч	. з. (90)		
		(10)	7,063	
	55 (4) сут		6,79; 6,72	
250	0,00025 (5) с			
251	0.8 (3) с		8,68 (20);	
			8,58 (80)	
252	2,30 (22) с	« (73)	8,42; 8,37	
		с. д. (27)		
253	1.7 (3) мин		8,01	
254			8,10	
254т				
255	3.1 (2) мин		8.12Г8,08: 7,93	
256	3.3 (2) с	**а (~ 99,7)**	8,44; 8,40	
		с. д. (0.3)		
257	25 (2) с	***а***	8,27^0); 8,22 (50)	
258	0,0012 с	с. д.		
259	60 мин	**а 78)**	7,53; 7,50	
		э.^з. (-22)		
255	22 (4) с		8,43; 8,37	
256	28 (3) е		8,52; 8.43; 8,39	

Эле-	*A*	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	Т-излученил
	257	0,646 (25) с	”	8.86; 8.80	
	258	4,3(5) с'	а	8,65; 8,61; 8,59	
	259	5,4 (8) с	*а*	8,45	
	260	180 (30) с	«	8,03	–
ш К и	253	~ 1,8 с	с.. д. (-50)	—	—
	254	0,0005 (2) с	с,. Д.	–	
	256	- 0,0005 с	с.. Д.		
	257	4,8 (3) с	*а.*	9,00; 8,95	0,127
	258	0,011 (2) с	с. Д.	–	–
	259	3,1 (7) с	*а*	8,87; 8,77	
	260	< 0,08 с	с. д.		
	261	65 (10) с	а	8,28	–
105	255	~ 1,2 с?	С., д. 20)	—	—
	257	5,0 (12) с	с,, Д. 20), а	9,16	
	260	1,52 (13) с	*а* (90), с. д. (10)	9,12; 9,07; 9,04	
	261	1.8 (4) с	*а* 75), с. Д. 25)	8.93	
	262	34 (4) с	(-40), с. Д. (-60)	8,66; 8,45	-
106	259	0,007 (3) с	с. д. **(-70), а (?)**		
	263	0,8 (2) с	«	9,25; 9,06	–
107	261	(1-2). 10-3 с	с. Д. (-20). а	—	—

В шестой колонке даны значения энергии (в мега-электрон-вольтах) основного ^-излучения, сопровождающего распад нуклида. В круглых скобках приведена интенсивность у-излучения (в процентах), отнесенная к полному числу распадов. В косых скобках указана (в процентах) относительная интенсивность ^у-излучения Если после значения энергии скобки отсутствуют, это показывает, что интенсивность точно не определена В ряде случаев приведен диапазон значений энергии у-излучения. Символ 0,511 (ан.) означает, что ^-излучение имеет аннигиляционное происхождение. Одной, двумя и тремя звездочками отмечены дублет, сложная линия и случай, когда все линии сложные.

Более детальные сведения о типах распада и ядерной структуре нуклидов, содержащиеся в международном файле ENSDF, могут быть получены через Центр по атомным и ядерным данным (ЦАЯД) Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР.

37.2. ЭТАЛОННЫЕ ЭНЕРГИИ ^ИЗЛУЧЕНИЯ, а-ЧАСТИЦ И КОНВЕРСИОННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В повседневной работе со спектрометрической аппаратурой полезны наборы эталонных значений энергии излучения как с точки зрения интерпретации спектров излучений, так и для градуировки спектрометрической аппаратуры.

В табл. 37.2 представлены эталонные значения энергии Y-квантов f1, 2]. Значения £7 охватывают диапазон энергий от 12 до 3500 кэВ и расположены в порядке возрастания энергии ^-квантов. Значения в скобках здесь и далее отвечают погрешности в младших разрядах значащих цифр.

В табл. 37.3 приведены энергии и абсолютные интенсивности Y-квантов [I, 2, 4] для некоторых нуклидов, испускающих один или несколько сильных у-квантов и наиболее удобных для градуировки полупроводниковых спектрометров. В табл. 37.4 приведены значения наиболее интенсивных групп а-частиц в диапазоне энергий излучения от 2,5 до 7,7 МэВ [1, 2]. Значения *Ea* расположены в порядке возрастания.

В табл. 37.5 собраны значения энергий и интенсивностей конверсионных электронов в диапазоне от 25 до 2500 кэВ [2], полезные для интерпретации спектров конверсионных электронов и градуировки электронных спектрометров.

В табл. 37.6 для ряда нуклидов приведены мультипольности наиболее интенсивных ^-переходов и экспериментально определенные значения коэффициентов внутренней конверсии.

Таблица **37.2. Эталонные энергии f-квантов в диапазоне энергий Е^ от 12 до 3500 кэВ [1,2]**

Продолжение табл. 39.1 Продолжение табл. 39. i

Нуклид	Период полураспада	, кэВ
2«Am(NpLi)*i	**432,2 года**	**11,890 (7)**
"Co	**270,9 сут**	**14,41302 (32)**
2«Am(NpL.)*1	**432,2 года**	**17,8(1)**
	432,2 года	**20,8(1)**
	464 сут	**22,1(1)**
M"Cd(Ag/CB)*i	**464 сут**	**25,0(1)**
2«Am	**432,2 года**	**26,345 (5)**
M'Cs (Ba K^)«	**30,0 лет**	**32,1(1)**
w'Cs (Ba K..)»	**30,0 лет**	**36,4(1)**
18зта	**5,1 сут**	**46,48502(16)**
ш х а	**5,1 сут**	**52,59648(12)**
Iззва	**10,5 года**	**53,156(5)**
	432,2 года	**59,537(1)**
i69Yb	**32,022 сут**	**63,12081(4)**
i82ja	**115 сут**	**65,72247 (14)**
i82ja	**115 сут**	**67,74998 (12)**
iMSm	**46,7 ч**	**69,67340(10)**
	46,6 сут	**70,8319(8)**
	46,6 сут	**72,8715(9)**
isssm	**46,7 ч**	**75,42257(17)**
108m Ag	**127 лет**	**79,14(3)**
i33Ba	**10,5 года**	**80,999 (4)**
iMSrn	**46,7 ч**	**83,36765(14)**
i82ja	**115 сут**	**84,6823(8)**
i^Cd	**464 сут**	**88,0341 (11)**
is^Sm	**46,7 ч**	**89,48646(15)**
i69Yb	**32,022 сут**	**93,61497(7)**
i^sm	**46,7 ч**	**97,43155(16)**
i83Xa	**5,1 сут**	**99,08182(10)**
i82ja	**115 сут**	**100,10652(7)**
	46,7 ч	**103,18072(14)**
i83Ta	**5,1 сут**	**107,93369(12)**
ш'.-ь	**32,022 сут**	**109,77988(6)**
i82Ta	**115 сут**	**113,67244(20)**
i82Xa	**115 сут**	**116,4201 (11)**
1ѳ Yb	**32,022 сут**	**118,18996(20)**
M^Eu	**13,33 года**	**121,7824 (3)**
"Co	**270,9 сут**	**122,06135 (13)**
i69Yb	**32,022 сут**	**130,52365(8)**
U2Ir	**73,83 сут**	**136,34304(49)**
"Co	**270,9 сут**	**136,47434 (30)**
i83Ta	**5,1 сут**	**144,12536(29)**
i82xa	**115 сут**	**152,43058(24)**
is^Ta	**115 сут**	**156,38740(29)**
169Ди	**3,139 сут**	**158,37945(10)**
i83Ta	**5,1 сут**	**160,53005 (48)**
issBa	**10,5 года**	**160,609 (25)**
i83Xa	**5,1 сут**	**161,34799 (9)**
i83Xa	**5,1 сут**	**162,32522(28)**
W3Sm	**46,7 ч**	**172,85407(15)**
1ѳ Yb	**32,022 сут**	**177,21417(9)**
i^xa	**115 сут**	**179,39486(24)**
i69Yb	**32,022 сут**	**197,95792(9)**
i82Xa	**115 сут**	**198,35302 (27)**
162Ir	**73,83 сут**	**205,79549 (68)**
166AU	**3,139 сут**	**208,20595(12)**
18зта	5,1 сут	209,87220 (45)
182Xa	115 сут	222,10980(30)
Iззва	10,5 года	223,116(35)
182Xa	115 сут	229,32197(64)
228Xh	1,913 года	238,632(2)
18зха	5,1 сут	244,26913 (55)
162EU	13,33 года	244,692 (2)
18зха	5,1 сут	246,06473 (23)
1ѳ Yb	32,022 сут	261,07865(12)
182Xa	115 сут	264,07542(30)
^ззва	10,5 года	276,404 (7)
203Hg	46,6 сут	279,1968(10)
18зха	5,1 сут	291,73096(68)
162EU	13,33 года	295,939(8)
192 Ir	73,83 сут	295,95825(13)
Iззва	10,5 года	302,858 (5)
wsYb	32,022 сут	307,73766(13)
1921r	73,83 сут	308,45689(15)
192II`	73,83 сут	316,50789(18)
61CT	27,7 сут	320,08419 (42)
162EU	13,33 года	344,275 (4)
18зха	5,1 сут	353,99767 (36)
1ззва	10,5 года	356,014(9)
162EU	13,33 года	367,789(5)
13зва	10,5 года	383,859(9)
162EU	13,33 года	411,115(5)
198AU	2,696 сут	411,80441(15)
108т **Ag**	127 лет	433,939 (4)
tio/^**Ag**	249,8 сут	446,812(4)
192Ir	73,83 сут	468,07147(27)
M4Cs	2,062 года	475,36 (5)
'Be	53,44 сут	477,605 (3)
192Ir	73,83 сут	484,57797 (41)
		511,006(2)
- c s	2,062 года	563,27 (5)
	2,062 года	569,30(3)
152EU	13,33 года	586,294 (6)
192Ir	73,83 сут	588,58446 (72)
124Sb	60,2 сут	602,728(12)
192Ir	73,83 сут	604,41415(47)
	2,062 года	604,68(2)
192Ir	73,83 сут	612,46504 (78)
108m Ag	127 лет	614,281(6)
tiomAg	249,8 сут	620,358 (3)
iMSb	60,2 сут	645,858(12)
tiomAg	249,8 сут	657,761 (2)
	30,0 лет	661,661 (3)
tlomAg	249,8 сут	677,627(4)
UomAg	249,8 сут	687,010(4)
162EU	13,33 года	688,678 (6)
tiomAg	249,8 сут	706,680 (5)
i^^Sb	60,2 сут	709,320(13)
i^oSb	60,2 сут	713,793(13)
i^^Sb	60,2 сут	722,789 (16)
108mAg	127 лет	722,938(8)
tlomAg	249,8 сут	744,279(5)
tlomAg	249,8 сут	763,949(5)
162EU	13,33 года	778,903 (6)
'^"Sb	60,2 сут	790,727 (16)
«-•Cs	2,062 года	795,78(2)
wocs	2,062 года	801,86 (3)
M2EU	13,33 года	810,459(7)
UomAg	249,8 сут	818,032 (5)
^«Mn	312,5 сут	834,848(17)

Интенсивные рентгеновские переходы, возникающие при распаде ядер.

Энергия аннигиляционного излучения, сопровождающего позитронный распад нуклидов.

Продолжение табл. 39.1 Продолжение табл. 39.1

13,33 года					
78,76 сут					
13,33 года					
73,83 сут					
249,8 сут					
83,83 сут					
106,6 сут					
13,33 года					
249,8 сут					
60,2 сут					
13,33 года					
78,76 сут					
2,062 года					
60,2 сут					
38 лет					
13,33 года					
13,33 года					
13,33 года					
244,1 сут					
83,83 сут					
115 сут					
115 сут					
2,062 года					
5,271 года					
78,76 сут					
115 сут					
13,33 года					
115 сут					
115 сут					
78,76 сут					
115 сут					
115 сут					
2,602 года					
115 сут					
13,33 года					
60,2 сут					
5,271 года					
115 сут					
78,76 сут					
2,062 года					
60,2 сут					
15,02 ч					
115 сут					
249,8 сут					
13,33 года					
13,33 года					
249,8 сут					
60,2 сут					
249,8 сут					
249,8 сут					
60,2 сут					
38 лет					
78,76 сут					
106,6 сут					
78,76 сут					
78,76 сут					
60,2 сут	2034,7551				
78,76 сут					
106,6 сут					
15,02 ч					
78,76 сут					
78,76 сут					
78,76 сут					
78,76 сут					
78,76 сут					

Таблица 37.3. Энергии и абсолютные интенсивности ^-квантов для некоторых источников, удобных для градуировки детекторов [1, 2, 4]

Нуклид	Е^ , кэВ	‘ν %/расп	Нуклид	Е,. КЭБ	‘ν %/расп.
	26,345	2,47(7)	198AU	411,80441 П5)	95,47(8)
	t s a r	36,5(2)	i^Cs	661,661 (3)	85,4(8)
	88,0341 (И)	3,75(7)	"Мп	834,848 (17)	99,978(2)
	14,41302	9,6(3)	«"Co	1173,238 (4)	99,87(6)
	122?06135 (13)	85,6(4)		1332,501 (5)	99,980(9)
	136,47434 (30)	11,1(3)	22Na	1274,542 (7)	99,95(3)
199AU	158,37945 (10)	100*	88Y	898,042	93,4(7)
	208,20595	22,1(3)*		1^6,063	99,37(2)
203Hg	279,1968 (10)	81,4(2)		2734,087 7ИЗ,1	0,72(7)
5iCr	320,08419 (42)	9,83(10)	24Na	1368,633	99,994(2)
				27М,030 (14)	99,87(2)

' Относительная интенсивность f

Таблица 37.4. Эталонные группы а-частиц в диапазоне энергий от 2,5 до 7,7 МэВ [1, 2]

Нуклид	Период полураспада	Б„ . МэВ
""Sm	1,03-108 лет	100
i60Gd	1,79-10® лет	100
	93 года	100
232Th	14,05-10» лет	77
		23
238U	4,468-10» лет	77
236U	7,038-108 лет	18
		5,7
23ви	2,34-10' лет	74
		26
230Xh	7,54-Ю^ лет	76.3
		23.4
234U	2,45-10= лет	72
237Np [3]	2,14-10® лет	
^ззи [3]	1,59-10В лет	
2-Pu [3]	14,4 года	
		12
131	3,76-106 лет	74
		26
23ipa	32 760 лег	И
		<20
		25,4
		22,8

Продолжение табл. 39.1

Нуклид	Период полураспада	, МэВ	Относительная интенсивность. %
239PU	**24119 лет**	**5,1554(7**	**73**
		5,1429(«	**15,1**
		5,1046	**11,5**
^^Pu [3]	**6537** лег	**5,1677(7**	**76**
		5,1233(7	**24**
	7380 лет	**5,2754(10)**	**88**
		5,2335(1	**10,6**
210PO	**138,38** сут	**5,30451(**	**100**
	432,2 года	**5,48560(12)**	**85,2**
		5,44298 13)	**12,8**
238PU	**87,74** года	**5,49921**	**72**
		5,4565(4 Г	**28**
	18,1 года	**5,804961**	**76,7**
		5,762835	**23,3**
2мст	**28,5** года	**5,7847 (£**	**73**
		5,7415(С	**И**
=60Cf [3]	**13,08** года	**6,0308 (f**	**85**
		5,9891 (£	**15**
^«Cm [3]	**162,8 сут**	**6,1129 (с**	**74**
		6,0695 (5)	**26**
^^Cf [3]	**2,638** года	**6,1183(5)**	**84**
		6,0757(5)	**16**
2«Cf [3]	**351** год	**6,1940(7)**	**2**
		5,813(1)	**84**
		5,760(1)	**4**
264ES	**275,7** сут	**6,4288(15)**	**93**
263ES	**20,47** сут	**6,63273(5)**	**89,8**
		6,5916 (2)	**6,6**
[3]	**20,07 ч**	**7,016(2)**	**93**

Таблица 37.5. Эталонные энергии конверсионных электронов в диапазоне энергий Eg от **25** до **2500 кэВ [2]**

Нуклид	Период полураспада	E^, кэВ	Интенсивность конверсионных электронов, %/расп.
199AU	**3,139 сут**	**34,986(7)**	**2,92 (14)**
		75,273(7)	**10,9(5)**
		125,099(7)	**6,4 3)**
		143,536(7)	**17,0(8)**
		154,813(7)	**4,38(19)**
203Hg	**46,6 сут**	**193,659(5)**	**16,9 (8)**
		263,842(5)	**4,35(13)**
		275,485(5)	**1,06 (3)**
198AU	**2,696 сут**	**328,7021 (9)**	**2,87(9)**
		396,9651 (И)	**1,02 (3)**
192Ir	**73,831 сут**	**217,5634 (8)**	**1,924(14)**
		230,0621 (8)	**1,790 (25)**
		238,1131 (8)	**4,47(14)**
		302,6280(5)	**1,95 (6)**
		389,6767(8)	**1,02(4)**
207Bi	**38 лет**	**481,665(20)**	
		553,809 (20)	**0,'435 (13)**
		975,615(20)	**7,04(23)**
		1047,759(20)	**1,78(6)**
		1059,769(20)	**0,587(8)**
w'Cs	**30,0 лет**	**624,208(5)**	**7,64(55)**
137тва	**2,55 мин**	**655,660(5)**	**1,38(50)**
««Co	**5,271 года**	**1164,906 (4)**	**-0,015**
		1324,170(5)	**-0,011**

Продолжение табл. 39. i

Нуклчд	Период полураспада	Ее , кэВ	Интенсивность конверсионных %/расп.
212Bi	**60,55 МИН**	**24,510(5)**	—
212pb	**10,64 ч**	**36,153(5)**	"
208T1	**3,07 мин**	**148,099(6)**	—
		222,238 (6)	"
		2526,66(10)	—

Таблица 37.6. Эталонные значения коэффициентов внутренней конверсии [1]

Нуклид	Период полураспада	E^, кэБ	Мультиполь-перехода	Коэффициент внутренней конверсии
W9Gd	**464 сут**		***E3***	**11,2(2)**
1«Ce	**32,50 сут**		***M\+0.T%E2***	**0,378(4)**
139ee	**137,66 сут**	**165,9**	***M***	**0,2152(33)**
io3Hg	**46,60 сут**	**279,2**	**£2 + 41% M**	**0,164(2)**
u3Sn	**115,09 сут**	**391,7**	**M4**	**0,438(6)**
198AU	**2,696 сут**	**411.8**	***E2***	**0,0302(3)**
	30,0 лет	**661,7**	***M4***	**0,0916(5)**
58CO	**70,78 сут**	**810.8**	***E2***	**0,000295(10)**
	312,5 сут	**834.8**	***E2***	**0,000224(10)**
«Zn	**244,1 сут**	**1115,5**	**M1 + 16% *E2***	**0,0001664(66)**

37.3. КВАНТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕР

В табл. 37.7 приведены экспериментально определенные значения спинов *I* магнитных моментов р, и электрических квадрупольных моментов Q основных и некоторых долгоживущих метастабильных состояний для четно-нечетных, нечетно-четных и нечетно-нечетных ядер. В таблицу не включены четно-четные ядра, у которых значения спинов и магнитных моментов основных состояний равны нулю. Значения /, р, и Q даны в единицах *П (h=h/2n*, где *h* — постоянная Планка), в ядерных магнетонах |х„ и фемтометрах соответственно. Значения спинов, указанные в круглых скобках, получены косвенным путем.

Таблица 37.7. Спины, магнитные моменты и электрические квадрупольные моменты ядер [1]

Элемент	Массовое число A	I, n		Q, фм»
iH	1	1/2	+2,7928456(11)	
	2	1	+0,8574376 (4)	+0,2875 (20)
	3	1/2	+2,978960(1)	
«гНе	3	1/2	—2,127624(1)	–
i L i	6	1	+0,8220467(6)	—0,0644(7)
	7	3/2	+3,256424 (2)	—3,66(3)
	8	2	+ 1,6532(8)	2,4(2)
«Be	9	3/2		+5,3(3)
бВ	8	2	1,0355(3	–
	10	3	+ 1,80065 (1)	+8,472 (56)
	11	3/2	|l-2,688637 (2)	+4,196
	12	1	-1,00306(15)	1,71 (16)
	13	3/2	**-3,17778 (51)**	4,78(46)
вС	**И**	3/2	**1,027 (10)**	3,08 (6)
	13	1/2	+0,702411 (1)	–
	12	1	+0,4573 (5)	–
	13	1/2	0,32224(35)	–
	14	1	+0,4037607 (2)	+ 1,56
	15	1/2	-0,2831892 (3)	–
«О	15	1/2	0,7189(8)	–
	17	5/2	—1,89379(9)	
.F	17	5/2	+4,7223 (12)	
	19	1/2	+2,628866 (8)	
	20	2	+2,0935(9)	7,0 (13)
loNe	19	1/2	-1,887 (1)	
	21	3/2	—0,661796(5)	+ 10,29(75)
	23	5/2	-1,08(1)	–
iiNa	20	2	+0,3694 (2)	—
	21	3/2	+2,38629(10)	-6,0 (75)
	22	3	+ 1,746 (3)	
	23	3/2	+2,217520(2)	+ 10,1(8)
	24	4	+1,6903(8)	
	25	5/2	+3,683(4)	
isMg	25	5/2	—0,85545(8)	
IзAI	25	5/2	+3,6455(12)	–
	27	5/2	+3,641504 (2)	+ 14,0(2)
	28	3	2,791 1)	–
I4Si	29	1/2	—0,55529 (3)	—
IьP	29	1/2	1,2349 (3)	—
	30	1		
	31	1/2	+ 1,13160(3)	
	32	1	-0,2524(3)	
leS	31	1/2	0,48793(8)	
	33	3/2	+0,643821 (1)	-6,4(10)
	35	3/2	±1,00	+4,5(10)
»,C1	35	3/2	+0,8218736 (5)	-8,249(2)
	36	2	+ 1,28547(5)	— 1,80(4)
	37	3/2	+0,6841230 (5)	—6,493(2)
	38	2	2,05(2)	—
«Аг	35	3/2	+0,633(2)	
	37	3/2	+0,95(20)	–
	39	7/2	-1,3(3)	
иК	36	2	**(+) 0,548(1)**	
	37	3/2	**+0,20321 (6)**	
	38	3	**+ 1,3737(10)**	Z
	39	3/2	+0,3914658(4)	+4,9 (4)
	40	4	-1,298099 (3)	-6,7(8)
	41	3/2	+0,2148699 (2)	+6,0 (5)
	42	2		
	43	3/2	o', 163^(2)^^	
	45	3/2	0,1734(4)	–

Продолжение табл. 39.1 Продолжение табл. 39.i

Элемент	Массовое число A		μ, $\mu_{яд}$
.oCa		3/2	1,02168(12)
	41	7/2	-1,594780(9)
	43	7/2	—1,31726 (60)
2iSc	41	7/2	5,43(2)
	43	7/2	+4,64(4)
	44	2	-2,56(3)
	44т	6	
	45	7/2	4 >56483(3)
		4	+3,03(2)
		7/2	+5,M(2)
		6	
		7/2	0,095(2)
	47	5/2	—0,78848(1)
	49	7/2	—1,10417(1)
Л1	47	3/2	
	48	4	1,63(10)
	49	7/2	4,47(5)
	50	6	+3,34745(3)
	51	7/2	+5,1514(1)
24Cr	49	5/2	0,476 (3)
	51	7/2	(—)0,934(5)
	53	3/2	-0,47454(3)
2bMII	51	5/2	3,568 (2)
	52	6	+3,0621 (14)
	52/п	2	0,0076
	53	7/2	5,024 (7)
	54	3	+3,2818(13)
	55	5/2	+3,468716(2)
	56	3	+3,2266(2)
	57	1/2	+0,09044(7)
		3/2	0,29(3)
27C0	55	7/2	+4,822(3)
	56	4	3,830 (15)
	57	7/2	+4,733(17)
	58	2	+4,044(8)
	59	7/2	+4,627 (9)
	60	5	+3,799(8)
eom	2		+4,40(9)
28Ni	57	3/2	0,88(6)
		3/2	—0,75002(4)
		5/2	0,69(6)
		2	+ 1,219(3)
		3/2	+2,14(4)
		1	—0,380 (4)
		3/2	+2,2233(2)
		1	—0,217(2)
		3/2	+2,3817(3)
		1	·0,282(2)
			—0,28164 (5)
30Zn		3/2	+0,7690 (2)
		5/2	+0,875478 (8)
		5/2	+ 1,8507(3)
3iGa			0,01175(6)
			+2,01659(4)
			+2,56227(2)
			—0,13224 (2)
3^Ce			0,735(7)
			+0,547(5)
			—0,8794669 (5)
			+0,510 (5)

Продолжение табл. 39.1

				Q. фм2
33AS		4	2,1(2)	
		5/2	(+) 1,6735 (18)	
		2	(—) 2,1578 (22)	
		2	—1,597 (3)	
		3/2	+ 1,43947(6)	+29
		2	-0,906(5)	
34Se		5/2	0,67(4)	+100
		1/2	+0,534270 (8)	
		7/2	— 1,018(15)	
		1	0,5482(1)	
		3/2	+2,106399(4)	+29,3
		1	0,5140(6)	19,9(8)
	SOm	5	+1,3177(6)	+76 (3)
	81	3/2	+2,270560(4)	
	82	5	+ 1,6270(5)	+76(3)
звKr		9/2	—0,970669(3)	+27,0(13)
		9/2	1,005 (2)	+45(3)
3,Rb		1	—0,0834 (3)	
		3/2	+2,05(2)	
		5	+1,6434(12)	
		5/2	Ы,43(2)	+27 (5)
		2	—1,297(11)	
		5/2	+1,35303(1)	
		2	-1,6920(14)	+20 (3)
		3/2	+2,75124(1)	+ 13.2(1)
		2	0,508 (5)	
38Sr		9/2	—1,09282 (65)	15(62_
		1/2	—0,1374153(3)	
	90	2	—1,630 (8)	-15,5(3)
	91	1/2	0,1641 (8)	
4Λ2Γ	91	5/2	—1,30362(2)	
> b	90	8	4,941 (4)	
	93	9/2	+6,1705 (3)	-36(7)
	95	9/2	6,123(12)	
	97	9/2	7,3(14)	
4rMo	95	5/2	-0,9142(1)	-1,9 (12)
	97	5/2	-0,9335(1)	—10,2 (39)
43Tc	93	9/2	6,15(74)	
	94	7	5,20 (25)	
	95	9/2	9,058(140)	
	96	7	+5,37(17)	
	99	9/2	+5,6847(4)	(+) 34 (34)
	97	5/2	0,687(27)	
	99	5/2	-0,6413(51)	+7,6(7)
	101	5/2	-0,7188(60)	+44(4)
	103	5/2	0,67(11)	
	105		<0,3	
5Rh	101m	g f	+5,51(9)	
	102	(6)	4,11 (15)	
	103	1/2	-0,08840 (2)	
	103m	7/2	+4,78 (10)	
	105	(7/2)	+4,428(13)	
uP:I	105	5/2	-0,642(3)	+80 (10)
fcAg	102m	2	+4,14(25)	
	103	7/2		
	104	5	*ttfi^'*	
	104m	2	+3?7 2)	
	105	1/2	0,1014(10)	
	106	1	+2,85(20)	
	106m	6	3,71 (15)	
	107	1/2	—0,113570(20)	
	108	1	+2,6884(7)	
	108m	6	3,580 (20)	152(8)

Продолжение табл. 39. i

Элемент	Массовое число *A*	*/. п*		*Q, фм«*
	109	1/2	-0,1306905(2)	
	109m	7/2	+4,27(13)	
	110	1	2,7271 (8)	
	110m	6	Ь3,607(4)	165(10)
	111	1/2	—0,146(2)	
	112	2	0,0547 (5)	
	113	1/2	0,159 (2)	
48Cd	105	5/2	-0,7393 (2)	+43 (4)
	107	5/2	—0,6150!S5(l)	+68(7)
	109	5/2	—0,827846(2)	+69 (7)
	111	1/2	—0,5948!B56 (9)	
	111m	11/2	—1,1051 (4)	—85 (9)
	113	1/2	-0,62306(7)	
	113m	11/2	—1,087783 (2)	-71 "(7)
	115	1/2	-0,648425(1)	
	115m	11/2	—1,041034(2)	-54"(5)
4sln	109	9/2	+5,53(6)	+89'
	110	2	+4,365(4)	+37
	111	9/2	+5,53(6)	+87
	112	1	+2,82(3^)	+9,3
	113	9/2	+5,5289(2)	+84,6
	113m	1/2	-0,21074(2)	
	114	1	^1,7(4)	
	114m	5	-г4,7(1)	
	115	9/2	+5,5408(2)	+86,1 (45)
	115m	1/2	—0,24398(5)	
	116	1	2,7867(8)	9(2)
	116m	5	+4,22 (8)	
	117m	1/2	-0,25174(3)	—
BaSn	113	1/2	0,880 (9)	
	115	1/2	-0,91883(7)	
	117	1/2	—1,00104 (7)	
	119	1/2	—1,04728 (7)	—
	119m	11/2	-1,40 (8:>	21 (2)
	121	3/2	0,699 (7)	8(4)
BiSb	115	5/2	+3,46(1)	-20(4)
	116	3		
	117	5/2	3,43(6)	-3O75)
	118	1	2,47(7)	
	118m	8	2,32(4;	
	119	5/2	+3,45(1)	-2174)
	120		2,34 (22)	
	121	5/2	+3,3634 (3)	—20 (3)
	122	2	-1,905(120)	+47 (3)
	123	7/2	+2,5498 (2)	-26 (4)
	124	3	1,20(2)	
	125	7/2	35)	
	126	(8)		
	127	7/2	2,59(12)	—
	128	8	1,31 (19^	
62Te	117	1/2		
	119	1/2	0,25 (5)	
	119m	11/2	0,95(5;1	
	123	1/2	-0,7367<)(2)	
	123m	11/2	—1,00 (5)	
	125	1/2	-0,8882?*US)*	
	125m	11/2	-0,93(5)	
	127	3/2	0,66(5)	
	127m	11/2	-0,91 I5)	
	129	3/2	0,66(5	-
	129m	11/2	—1,15(5	
	131m	11/2	—1,04(4	

	Массовое число A	I. J		Q. фм!	Элемент	Массовое число A	/. J	V: 14l	Q. фм'
вз1	125	5/2	3,0(10)	—88,9	e4Gd	155	3/2	—0,2591 (5)	+159(16)
	127	5/2	**+2,81327(8)**	—78,9		157	3/2	—0,3398(7)	+203(26)
	129	7/2	**+2,6210(3)**	—55,3		159	3/2	-0,44(3)	
	131	7/2	+2,742(1)	-40(1)	вбТЬ	156	3	18)	+ 140(45)
	132	4	3,088(7)	9(1)		157	3/2	2,0(1)	–
	133	7/2	+2,856(5)	-27(1)		158	3	hi.758 (7)	+270(50)
иXe	129	1/2	—0,777976 (9)			159	3/2	щ2,014 (4)	118(12)
	129m	11/2	—0,847 (28)			160	3	+1.702 (8)	+300(50)
	131	3/2	+0,691861 (4)	—12,0(12)	вбРУ	153	7/2	—0,72(9)	-15(8)
	131m	11/2	—0,80(10)			155	3/2	-0,34(3)	**+94(10)**
	133m	11/2	-0.87(12)			157	3/2	—0,30(3)	**+127(14)**
beCs	125	1/2	+1.41(2)	–		161	5/2	-0,4805(51)	+244 (17)
	127	1/2	+ 1,46(2)	–		163	5/2	+0,6726 (35)	+257(17)
	129	**1/2**	+1,482(9)	–		165	7/2	0,51	280
	130	**1**	1,4	—	^Ho	165	7/2	+4,173(27)	+273 (6)
	131	5/2	**+3,543 (2)**	-62,0 (6)		166m		4,1 (6i)	–
	132	2		+50,8(7)	esEr	161	&	-0,370 (5)	+120(9)
	133	7/2	+2;582023(9)	-0,3(1)		163	5/2	+0,57(2)	+220 (20)
	134	4	+2,9937(9)	+38,9 (3)		165	5/2	0,66 (3)	220(10)
	134m	8	+ 1,0978(2)			167	7/2	-0,5665(24)	+282,7(12)
	135	7/2	+2,7324(2)	+5,0(2)		169	1/2	+0,515 (25)	–
	136	5	+3,711 (15)	22,5(10)		171	5/2	0,70(5)	240(20)
	137	7/2	+2,8413(4)	+5,1(1)	eoTm	163	1/2	0,081 (2)	–
	138	3	**0,48(10)**			165	1/2	0,139 (2)	–
иВа	133	1/2	**—0,769(3)**	–		166	2	0,092	185 (15)
	135	3/2	+0,837943 (17)			167	1/2	—0,197	–
	137	3/2	+0,937365 (20)	+28(3)		169	1/2	—0,235(3)	–
	137m	11/2	–	5		170	1	0,2476(36	57,4 (9)
	137	7/2	+2,695(6)	+26(8)		171	1/2	0,2303 (36)	
	138	5	+3,7139(3)	+51 (9)	,oYb	169	7/2	—0,63(2)	+410'(6)
	139	7/2	+2,7832(2)	+22(3)		171	1/2	+0,49367(1)	–
	140	3	**+0,730(15)**	+ 10,3(11)		173	5/2	-0,67989(3)	280 (20)
ввCe	137	3/2	**0,91 (15)**	–		175	7/2	**0,40(5)**	–
	137m	11/2	0,70(3)		7ILU	171	7/2	**2,03(10)**	
	139	3/2	0,96(20)			172	4	2,25(10)	
	141	7/2	0,970 (30)	–		173	7/2	2,34 (9)	–
	143	3/2		–		174	(1)	1,94(28)	–
	141	5/2	4,136 (2)	—5,89(42)		174m	6	2,34 (:33)	
	142	2	+0,234 (1)	+2,97(85)		175	7/2	h2.2327**(11)**	+568(6)
	142m	5	2.2(1)	–		176	7	-3,19 (:3)	+800(70)
	143	7/2		–		176m	1	-0,318 (3)	-239(4)
,oNd	143	7/2	-1,065(5)	—48,4 (20)		177	7/2	-2,239 (11)	+551 (6)
	145	7/2	—0,656(4)	-25,3 (10)		177m	23/2	2,75 (21)	–
	147	5/2	0,578(3)	90 (30)	72Hf	175	5/2	0,70(10)	+270 (40)
	149	5/2	**0,351 (10)**	130(30)		177	7/2	+0,7935(6)	+450(50)
jiPm	143	5/2	**3,78(50)**	–		179	9/2	—0,6409(13)	+510(50)
	144	5	**1.69(14)**	–		**179m2**	25/2	7,43 (34)	–
	147	7/2	**+2,58(7)**	+74 (20)		**180m**	8	+8,7(10)	+440(50)
	148	1	1,84(19)	+20(20)	7ъTa	181	7/2	2,371	+390
	148m	6	1,82(18)			182	3		
	149	7/2	3,3(5)		,4W	183	1/2	+0,^/77847(1)	z
	151	5/2	1,8(2)	190 (30)		187	3/2	0,688 (21)	–
e2Sm	145	7/2	0 ,92 (6)	–	75Re	181	5/2	3,242	–
	147	7/2	—0,8148(7)			183	**(5/2)**	3,03 (	–
	149	7/2	—0,6717(7)			184	3	2,499(51)	
	151	5/2	0,355(15)			184m	8	2,86 (13)	
	153	3/2	-0,0216(1)	**4-100(10)**		185	5/2	**+3,1871**(3)	236 (50)
	155	3/2	–	**90 (10)**		186	1	**+ 1,739**	-40
csEu	151	5/2	**+3,4717(6)**	+ 115(9)		187	5/2	**+3,219**	224 (50)
	152	3	**—1,9414(13)**	+316 (35)		188	1	+1,788 (5)	-40
	153	5/2	+1,5330(8)	+294 (23)	7eOs	187	1/2	+0,06465184 (6)	–
	154	3	2,005(6)	+390 (50)		189	3/2	0,659933(4)	+91 (10)
	155	5/2	1,93 (26)			193	(3/2)	1,30 (19)	

продолжение табл. 37.7

Массовое число A		μ_n	Q.
191	3/2	+0,1461 (6)	78 (20)
191т	11/2	6,026(36)	
192	4	+ 1,880(11)	
193	3/2	+0,1591 (6)	7008)
194	1	0,37(4)	
195	1/2	+0,60949(6)	
195т	13/2	0,597(15)	
197	1/2	0,51 (2)	
190	1	0,066	
191	3/2	0,138(7)	
192		0,0079(11)	
193	3/2	0,140(7)	
194	1	0,074 (4)	
195	3/2	0,148(7)	
195т	11/2	6,268 (31)	
196	2	+0,5914(14)	
196^2	12	5,35(20)	
197	3/2	+0,145746 (9)	),4(10)
198	2	+0,5934 (4)	
198т	%	5,55(35)	
199	12	+0,2715(7)	
200m		6,10(20)	
181	1/2	+0,5071 (7)	
183	1/2	--0,524 (5)	
185	1/2	--0,507(4)	
187	3/2	—0,593(4)	—50 (23)
191	(3/2)		—41 (41)
193	3/2	—0,62757(18)	—86 (38)
193т	13/2	—1,058429 (3)	+108 (10)
195	1/2	+0,541475(1)	—
195т	13/2	—1,044647 (3)	+127 (11)
197	1/2	+0,5273741 (9)	—
197т	13/2	-1,027684 (3)	+147 (13)
199	1/2	+0,5058851 (9)	
199т	13/2	—1,014702 (3)	+ 140(42)
201	3/2	—0,560225(1)	+45,5(40)
203	5/2	+(>,84895(13)	+40(4)
205	1/2	+0,6010	
194	2	0,14 (1)	
195	1/2	+1,58 (4)	
196	2	0,07 (1)	
197	1/2	+1,58 (2)	
198	2	0,00 (1)	
198т	7	0,64 (7)	
199	1/2	+1,60 (2)	
200	2	0,04 (1)	
201	1/2	+1,61 (2)	
202	2	0,06 (1)	
203	1/2	+1,622257	
204	2	0,0908	
205	1/2	+ 1,6382134 (7)	
207	1/2	0,58219 (2)	
203	9/2	+4,62(5)	
204	6	+4,28(5)	
205	9/2	4,16(11)	
206	6		-19(5)
207	9/2		-50 (15)
209	9/2	+4,1106(2)	
210	1	—0,0446(1)	+13(1)

Продолжение табл. 37.7

Элемент	Массовое число A	/. a	V-n	Q. фм«
мРо	205	5/2	~+0,26	+17
	207	5/2	~+0,27	+28
	209	1/2	~+0,77	
esAt	211	9/2		
	213	9/2	—	—
89AC	227	3/2	+ 1.1(1)	+170(20)
9oTh	229	5/2	[-0,46(4)	+430 (90)
«Pa	231	3/2		
	233	3/2		—300
92U	233	5/2	+0,55	+350
	235	7/2	—0,35	455(9)
93NP	237	5/2	+3,14(4)	+410 (70)
	238	2		
84PU	239	1/2	+0,203(4)	
	241	5/2	-0,683 (15)	+560'(200)
esAm	241	5/2		+490
	242	1	-0',3878\15)	—276
	243	5/2	hi.61 (4)	+490
seCm	243	5/2	0,41	
	245	7/2	0,5 (1)	
	247	9/2	0,37	
„m	249	7/2	2,0(4)	+579
99ES	253	7/2		670 (80)
	254т	2		370 (50)

37.4. РАДИОАКТИВНЫЕ РЯДЫ [2]

На рис. 37.1—37.4 представлены соответственно радиоактивные ряды тория, нептуния, урана-радия и урана-актиния. Указаны химический символ элемента, массовое число ядра и его период полураспада. Символы у стрелок указывают тип распада (а, Р и. п.). Если нуклид распадается двумя путями, то у стрелок указано относительное ветвление типов распада.

« Z j h

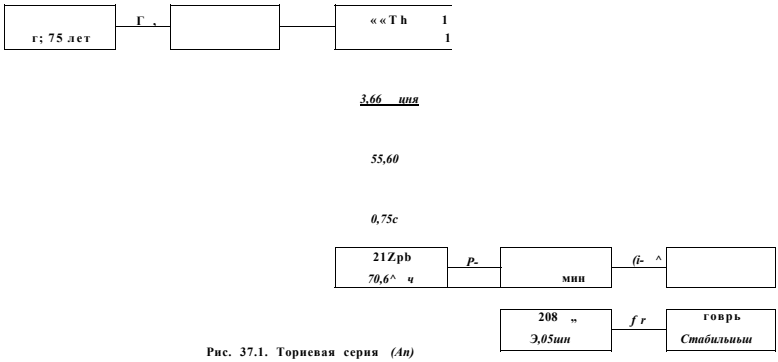


Рис. 37.1. Ториевая серия *(An)*

-Щ-ЯР

'Ра I /Г 233U
27,^7 дней *7,59-70^лег*

7,3-70^янв
- Щ —

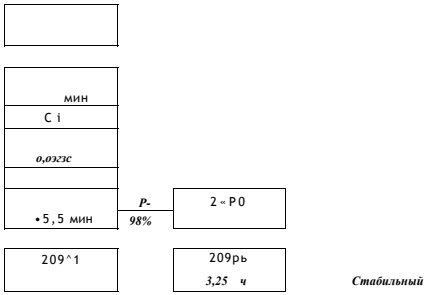


Рис. 37.2. Нептуниевая серия (4n+1)

» в и

Рис. 37.3. Уран-радиевая серия (4л+2)

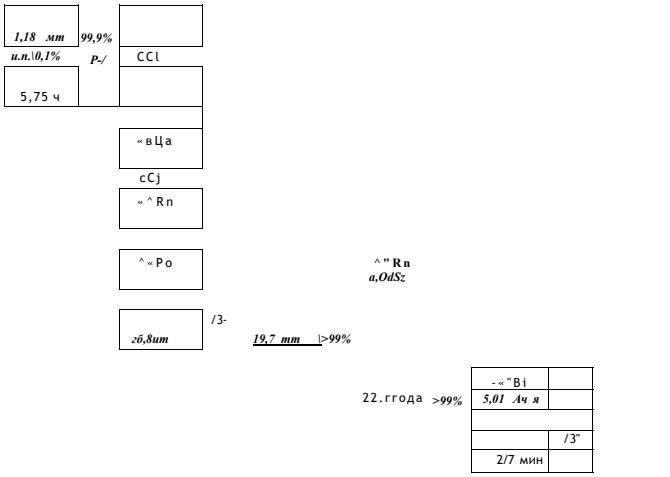


Рис. 37.4. Уран-актиниевая серия (4п+3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Table of Isotopes. — 7th ed./Ed. by C. M. Lederer and V. S. Shirley. N. Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1978.

2. Seelmann-Eggebert W., Pfennig G., Munzel H., Klewe-Nebenius H. Nuklidkarte, 5 Auflage. Mfinchen: Gerbash und Sohn Verlag, 1981.

3. Баранов С. А., Кулаков В. М., Шатинский В. М.// Ядерная физика 1969. Т. 7, вып. 4. С. 724—730: 1971. Т, 14, вып. 5. С. 1101—1102.

4. Greenwood R. C., Helmer R. G., Gehrke R. J.// Nucl. Instrum. Methods. 1979. Vol. 159. P. 465.

5. Holden N. E., Martin R. L., Banes I. L.//Pure Appl. Chem. 1984. Vol. 56, N 6. P. 675—702.

Глава 38
МЁССБАУЭРОВСКИЕ ЯДРА

С. С. Якимов. В. М. Черепанов

38.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Эффект Мёссбауэра или ядерный гамма-резонанс (ЯГР) — это бесфононное (т. е. без потери энергии на отдачу) излучение или поглощение резонансных Y-квантов ядрами атомов, находящихся в конденсированной среде.

Высокое энергетическое разрешение ЯГР Го/£о«« (Го=й/т) — естественная ширина ядерного уровня; т — среднее время жизни возбужденного ядра; Ео=Ее—Eg — энергия Y-перехода между возбужденным *е* и основным *g* состояниями ядра) позволяет не только измерять очень малые изменения энергии (порядка 10-'" эВ), но и наблюдать сверхтонкую структуру ядерных уровней, вызванную электрическими и магнитными электронно-ядерными взаимодействиями.

Спектр прошедшего через поглотитель излучения, получаемый обычно в ЯГР при относительном (со скоростью *V)* движении резонансного источника и поглотителя, обусловлен изменением энергии у-квантов Д£= =*£—Eo^Eov/c ƒС* — скорость света) в результате эффекта Доплера и определяется выражением

$$E(t;) = \int N(oo) - N(!;)\,/[iV(oo) - N\phi\,],$$

где *N{oo)* — интенсивность вне резонанса; *N(v)* — интенсивность при относительной скорости *v;* —не зависящая от V интенсивность фона, определяемая из дополнительного эксперимента. Аналитическое выражение для спектра в случае «тонкого» источника (без самопоглощения) и поглотителя с одиночной линией при условии совпадения в них энергий переходов (см., например, [1]):

$$^M = fs\ p(^) \{1 — P[- /л «л ° (^)J\}$$

где *FiE)* = |Г„/27г)| *{[E -E„(\ + v/c)f* + (Г„/2)^}-1 — для лоренцевой формы линии излучения источника; *fs, !a* — вероятности излучения и поглощения у-квантов; Пд, см-2 — число ядер резонансного нуклида на 1 см=; ст =(2яс= h^/E1)[{E-EoУ+{п/2)Ц-^ - сечение поглощения у-кванта с энергией £; сго= = *{2nc^h"/El)[{2le+l)l{2le+l)]l*(-)-*ar)* — сечение при *E=Ec; Ig, h* — спины ядра в основном и возбужденном состояниях; ат — полный коэффициент внутренней конверсии.

Максимальное поглощение е (t)=0) и площадь спектра S даются выражениями:

$$^(0) = /s\ 11 - exP(-tA/2) /2)];$$

$$S = \int E(t))\,dt- = (л\Gamma_{„}/2) t^X$$

$$X\exp(-tj,/2)|7_{„} /2) + \{it J,/2)],$$

где /о и /, — функции Бесселя нулевого и первого порядков от мнимого аргумента; <а=/лПдСГ(£о) — эффективная толщина поглотителя.

Если источник не тонкий, то при учете самопоглощения в нем формула для е(0) приобретает вид [2]:

где *K(x)=xexp {—x/2)[lo[i x/2)+1^(1 x/2)]-, x^ts, t^, ts+tA', ts=fsnsa(Eo),* а площадь спектра не зависит от формы линии излучения.

Основными считаются следующие параметры мёссбауэровских спектров [3—6].

1. *Изомерный (химический) сдвиг* S *мессбауэровской линии,* обусловленный разностью радиусов ядра в возбужденном и основном состояниях *&R=Re—Rg* и разностью плотностей электронов на ядрах поглотителя и источника и |\l)s(0)|2 соответственно:

где *A= {4n/5)eWZS(Z); e* — элементарный заряд; *Z* — заряд ядра; *S(Z)* — зависящий от *Z* релятивистский множитель, протабулированный в [7].

При различии температур источника и поглотителя возникает дополнительный, так называемый температурный сдвиг линии поглощения в результате релятивистского эффекта Доплера второго поряда по *vfc:*

где (f®) — средняя квадратическая скорость мёссбауэровского атома.

В классическом пределе, справедливом при высоких температурах,

kTI(2 Mc^),

где *k* — постоянная Больцмана; *T* — температура; *M* — масса атома.

2. *Квадрупольное расщепление* Д *ядерных уровней.* вызванное взаимодействием квадрупольного момента ядра *Q* с неоднородным электрическим полем ^=gradiE', описываемым гамильтонианом

где I±=1x±Uy. Он имеет собственные значения

$$En = \frac{eqQ}{4/(2/—1)} \qquad (1 + f/3)$$

= /, *I — I,* . . . , — /.

Параметр асимметрии имеет вид 1]= (Vj^j^— где

Yyy I

= *ff^V/dy^';* = *^V/dz^;* *V* — потенциал электрического поля.

В частном случае аксиально-симметричного градиента поля для ядра ®⁷Fe (/g=1/2, /<,=3/2) линия расщепляется на дублет с расстоянием между компонентами

Д = £(3/2, 3/2) — £(3/2, *1/2) = etjQf2,*

где д^Угг — градиент электрического поля.

3. *Магнитное расщепление ядерных уровней,* вызванное сверхтонким взаимодействием дипольного магнитного момента ядра fi с магнитным полем на ядре *Hn,* которое создается электронами собственного атома и магнитными моментами соседних атомов, а также поляризованными электронами проводимости [3—6].

Магнитное взаимодействие приводит к полному снятию вырождения ядерных уровней, положения которых выражаются формулой

где — ядерный магнетон; Ш/ — магнитное квантовое число (правила отбора для магнитных диполь^^ых переходов Д/п/=0,±1).

Расстояние между соседними эквидистантными подуровнями АЕ„=giXnHn, где *g* — гиромагнитное отношение (ядерный ^--фактор).

При добавлении к магнитному дипольному электрического квадрупольного взаимодействия эквидистантность подуровней нарушается. Для положения ядерных подуровней определяются соотношением:

$$E \qquad / / + (-1) \qquad , \ I \text{ -}+\text{- } 1/2 \qquad £\cdot 90(300526- 1)/8,$$

где е — угол между осью z градиента электрического поля и направлением магнитного поля.

38.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕССБАУЭРОВСКИХ ЯДЕР

В табл. 38.1 приведены следующие характеристики мёссбауэровских ядер [8, 9]:

символ изотопа с массовым числом;

содержание мёссбауэровского изотопа в естественной смеси;

Ео — энергия мёссбауэровского перехода;

Ti,2 — период полураспада резонансного уровня;

Г — минимальная наблюдаемая ширина линии, определяемая по формуле Г=21n2(Й/Г1/2);

Er — энергия отдачи свободного ядра;

От — полный коэффициент внутренней конверсии;

Оо — полное сечение резонансного поглощения;

fg. le — значения спина основного и возбужденного состояний ядра;

рв> Це — значения магнитного момента основного и возбужденного состояний ядра (в ядерных магнетонах):

Qg. Qe — значения квадрупольного момента основного и возбужденного состояний ядра;

сведения о материнских изотопах мёссбауэровского ядра (массовое число, тип распада, период полураспада, э. 3. — электронный захват).

Таблица 38.1. Значения характеристик мессбауэровских ядер

Ядро	Содержание, %	*E*, кэВ	7-1/2.	г, мм/с	10 ° эВ	«г	Ш-'Г'см"!		*'e*			1П-" СМ2	10-" СМ	Сведения о материнском ядре
«К	0,012	29,56	4,25	2,177	11,73	0,35	28,65	4-	3-	-1,298	-	-0,093	-	^)^d, p)
	2,14	14,413	97,81	0,194	1,956	8,21	255,8	1-2	3-2	0,09060	-0,1553	0	+0,21	"Со(э. 3., 270 сут), 1,6 млн)
	2,14	136,48	8,7	0,230	175,4	0,14	34,50	1-	5-2	0,09060	—0,9785	0	—	-
6iNi	1,19	67,408	5,27	0,770	39,98	0,13	71,16	3-	5-2	-0,7498	+0,478	+ 0,162	-0,20	"Со ([5-, 99 мин), в'СиСэ. 3., 3,41 ч)
6'Zn	4,11	93.317	9150	32-10-5	69,77	0,89	4,955	5-	1-2	+0,8755	+0,578	0		e'Ga(3. 3., 78 ч), "Си (р-, 59 ч)
"Ge	7,76	13,263	2953	0,007	1,293	1095	0,761	9+2	5+	-0,8792	-0,941	-0,18	-	'8As(3. 3., 80,3 сут), 73Ga (Р-, 4,9 ч)
"Ge	7,76	68,752	1,86	2,139	34,76	0,8	22,88	9^2	7+2	-	-	-	-	-
MKr	11,55	9,40	147	0,198	0,571	19,6	107,5	9+2	7+2	-0,9703	-0,942	f0.253	+0,43	мвг (|)-, 2,39 ч), 83Rb (э. 3, 86,2 сут)
в'Тс	0	140,51	0,237	8,215	107,1	0.15	8,621	9"2	7+2	+5,6807	+3,7	+0,34	-	в9Мо 6,7 ч)
«Ru	12,72	89,36	20,5	0,149	43,30	1,5	8,042	5+2	3+2	—0,638	-0,28	+0,12	+0.34	MRh (э. 3., 16,1 сут), 9e'«Rh (э. 3., 4,7 ч)
"iRu	17,07	127,22	0,581	3,701	86,02	0,16	8,688	5+2	3+2	-0,68	-0,31	-	-	i»iRh (э. 3., 3 года), loiTc (Э-, 14,0 мин)
i«'Ag	51,4	93,1	44,3-10!'	6,6-10-"	43,4	20	5,3	1-2	7+2	-0,1136	-	0	-	i«Cd (э. 3., 6,6 ч), lO'Pd (р-, 7- 10' лет)
»'Sn	7,61	158,53	0,277	6,230	115,3	0,159	16,80	1-2	3+2	+ 1,0001	-	0	-	'"Sb (э. 3., 2,8 ч), 11"«1n 1,93 ч)
iwSn	8,58	23,871	17,86	0,642	2,570	5,1	140,3	И2	3"2	—1,0461	+0,633	0	-0,064	ii9«Sn (245 сут), iwSb (э. з.,38 ч)
i2iSb	57,25	37,138	3,5	2,105	6,118	11,1	19,55	5-2	7»2	+ 3.3591	+2.47	-0,28	-0,38	is-'^Sn (3-, 50 лет)
i25Te	6,99	35.492	1,481	5,204	5,409	13,6	26,51	1+2	3^2	-0,8872	+0,60	0	-0,20	'«Sb (Р-, 2,7 лет), 126i (э. 3., 60 сут)

1271	100	57.60	1,95	2,435	14,02	3,78	20,57
1291	0	27,77	16,80	0,586	3,209	5,1	39,01
	26,44	39,581	1,01	6,843	6,519	12,3	23,48
isiXe	21,18	80,183	0,500	6,823	26,34	1,6	7,403
133CS	100	80,997	6,313	0,535	26,48	1,72	10,28
mBa	0	12,29	8,10	2,748	0,610	_	29,18
«"La	99,91	165,85	1,50	1,100	106,2	0,26	5,282
Mipr	100	145,42	1,85	1,017	80.50	0,46	10,57
"Wd	8,30	67,25	29,4	0,138	16,74	6,1	3,810
i«Nd	8,30	72,50	0,72	5,241	19,46	4,9	5,917
mpm	0	61,25	2,62	1,705	13,89	6,42	11,72
"'Pm	0	91,03	2,57	1,169	30,26	_	6,920
i«Sra	14,97	122,1	0,80	2,801	54,44	_	6,154
"sSm	13,83	22,494	7,12	1,708	1,823	50	7,111
isiSm	0	65,83	20	0,208	15,40	_	8,352
i52Sm	26,72	121,78	1,41	1,593	52,37	1,17	38,01
	0	35,842	2,0	3,816	4,507	_	146,5
	22,71	81,99	3,0	1,112	23,43	_	30,08

5+ 2	7+ 2	+2,8091	+2,54	-0,79	+0,70	i27mje (Э-, 109 сут), i"Xe (э. 3., 36,4 сут)
Л . 2	5+ 2	+2,6174	+2,797	-0,55	—0,68	i2e-txe (f)-^ 34 сут)
1+ 2	2	-0,7768	+0,68	0	-0,41	128i 1,57.10' лет), (э. 3., 2,2 ч)
JL 2	1+ 2	+0,6908	_	-0,12	0	13i1 (р-, 8,05 сут)
7+ 2	2	—2,5786	+3,44	-0,003		1ззВа (э. 3., 10,5 лет), 1ззхе 5,29 сут)
1+ 2	i l 2			0		133'пВа (38,9 ц)
7* o	5+ 2	+2,7781	–	+0,21	-	139Ва(Э-, 84,9 мин), 139Ce (э. 3., 140 сут)
2	2	+4,162	+2,80	-0,059	+0,3	1«Ce (р-, 32,5 сут), i«Nd (э. 3., 2,5 ч)
7- 2	3- 2	—0,654	-0,320	-0,254	–	i«Pm (э. 3., 17,7 года), "Фг (р-, 5,98 ч)
7- 2	5- 2	-0,654	-0,32	-0,254	–	
5+	7+ 2	-	–	–	-	i«Sm (э. 3., 340 сут)
7+ 2	5+	+2,62	+3,60	+0,71	+0,6	i«Nd (Ft-, 11,1 сут)
7 2	^ 2					
7- 2	5- 2	-0,670	-0,623	+0,058	+0,50	i«Eu (э. 3., 93 сут), 1«Pn1 (р-, 53 ч)
0+		0	+0.58	0	-1,6	152Eи(э. 3., 12 лет), 16фт (Р-, 6 мес)
3 2	_3_ 2					
0+	2+	0	+0,79	0		Кулоновское возбуждение

Ядро	Содержа-ние, %	*E,* КЭВ	7-./2. Нс	Г, ММ/с	*ER,* 10-' эВ	•*ij*	Оо, 10-2-' см-
isiEu	**47,82**	**21,532**	**9,7**	**1,310**	**1,648**	**28,6**	**23,77**
i63Eu	**52,18**	**83,365**	**0,82**	**4,002**	**24,38**	**3,82**	**9,738**
163EU	**52,18**	**97,429**	**0,21**	**13,37**	**33,30**	**0,42**	**17,97**
153EU	**52,18**	**103,18**	**3,9**	**0,680**	**37,35**	**1.78**	**5.456**
lS4Gd	**2,15**	**123,07**	**1,17**	**1,900**	**52,79**	**1,2**	**36,71**
155Gd	**14,73**	**60,01**	**0,194**	**23.49**	**12.47**	**8.72**	**10.48**
i66Gd	**14,73**	**86,545**	**6,33**	**0,499**	**25,94**	**0,43**	**33,92**
i66Gd	**14,73**	**105,31**	**1,168**	**2,224**	**38,41**	**0,26**	**16,46**
"«Gd	**20,47**	**88.966**	**2,17**	**1,417**	**27,23**	**3,9**	**31,35**
i§'Gd	**15,68**	**54,54**	**0,187**	**26,82**	**10,17**	**11,9**	**9,586**
«'Gd	**15,68**	**64,0**	**460**	**9,3-10-3**	**14,00**	**0,97**	**23,19**
issGd	**24,87**	**79,51**	**2,54**	**1,355**	**21,48**	**—**	**27,56**
leoGd	**21,90**	**75,26**	**2,7**	**1.346**	**19.00**	-	**25,65**
IIITЬ	**100**	**57,995**	**0,105**	**44,92**	**11,35**	**9,36**	**10,53**
leoDy	**2,29**	**86,788**	**2,037**	**1,547**	**25,27**	**4,5**	**29,42**
leiDy	**18,88**	**25,655**	**28,2**	**0,378**	**2,194**	**2,9**	**95,31**
MiDy	**18,88**	**43,83**	**0,78**	**8,002**	**6,405**	**4,32**	**31,92**
uiDy	**18,88**	**74,577**	**3,31**	**1,108**	**18,54**	**0,65**	**6,754**
M2Dy	**25,53**	**80,65**	**2,27**	**1,494**	**21,55**	-	**121.3**

Продолжение табл. 38.1

			P-g			Сведения о материнском ядре
5+ 2	↓ 2	+3,465	+2,587	+1,14	+ 1,49	i6iGd(3. 3., 120 сут), i53Sra (P-, 90 лет)
Л-2	7- 2	+ 1,5249	+ 1.80	+2,8	–	i^'Sm (Э-, 46,7 ч), iMGd (э. 3., 242 сут)
5+ 2	5- 2	+ 1,5249	+0,793	+2,9	–	
5+ 2	3+ 2	+1,5249	+2,04	+2,9	+1,5	
0-"	2+	0	0,85	0	—	154EU (p-, 16 лет)
3- 2	5- 2	-0.2584	–	+ 1.6	–	«бЕи (p-, 4,96 года), 1«ТЬ (э. 3., 5,6 сут)
3- 2	5-^ 2	-0,2584	-0,528	+ 1,6	+0,32	
3- 2	↓ 2	-0,2584	-	+ 1.6	+ 1,6	
	↕'	0	1·1,↑↑1	0	-2,1	i^Eu (p-, 15 сут), 1авТЬ(э. 3., 5,4 сут)
3- 2	5- 2	-0,3388	-0,513	2,0	3,6	i-"Eu (p-, 15,2 ч)
3- 2	5-^ 2	-0,3388	-0,513	2,0	3,6	
0+	2+	0	+0,77	fl	+ 1,5	i"Gd (л. If)
0+	2+	0	+0,61	0	+ 1,6	
3+ 2	5+ 2	+2,008	+ 1,606	+1,3	–	i69Gd (p-, 18,6 ч), 1б90у(э. 3., 144,4 сут)
0+	2+	0	+0,724	0	1,7	w»Tb (p-, 72,1 сут)
5+ 2	7- 2	-0,479	+0,584	+2,3	+2,3	"iTb (p-, 6,9 сут), 1в1Но(э, 3., 2,45 ч)
5+ 2	7+ 2	-0,479	—0,140	+2,35	+0,5	
5+ 2	3- 2	-0,479	-0,391	+2,3	+1,4	
0+	2+	0	+0,74	0	–	wiDy (Л. 7)

le^Dy	28,18	73,392	2,39	1,560	17,63	-	22,05
1n6Ho	100	94,699	0,022	130,1	29,17	3.1	8,277
164Er	1,56	91,39	1,47	2,036	27,34	_	28,27
1IIEr	33,41	80,557	1,87	1,816	20,98	6,93	23,77
In7Er	22,94	79,322	0,119	29,0	20,22	5,74	7,211
lesEr	27,07	79,80	1,88	1,823	20,35	-	23,60
I'OEr	14,88	79,31	1,9	1,815	19,86	-	23,35
"втта	100	8,401	4,0	8,141	0,224	291	23,74
iTOYb	3,03	84,253	1,608	2,019	22,41	6,12	24.20
ш у ь	14,31	66,719	0,87	4,713	13,97	13	7,852
iTiYb	14,31	75,875	1,64	2,198	18,07	7,8	14,44
172Yb	21,82	78,69	1,80	1,931	19,32	8,5	20,79
174Yb	31,84	76,469	1,76	2,033	18,04	9,4	20,10
I76 Yb	12,73	82,13	2,0	1,665	20,57	7,1	22,47
	97,41	113,80	0,100	24,04	39,72	2,51	6,728
"«Hf	5,20	88,361	1,39	2,227	23,81	-	22,84
177Hf	18,50	112,97	0,5	4,843	38,70	-	5,991
178Hf	27,14	93,174	1.495	1,964	26,18	4,6	25,16
ISOHf	35,24	93,332	1,50	1,954	25,98	4,7	24,59
i8iTa	99,99	6,238	6800	0,0064	0,115	80	94,69
isiTa	99,99	136,25	0,040	50,19	55,05	1,76	5,969

0+	2+	0	+0,84	0	-1,12	"Що (э. 3., 37 мин)
—	9-	+4,12	+4,12	+2,4	+2,6	ie~Dy 2,33 ч)
0+	2+	0	+0,7	0	–	(р-, 37 мин)
0+ •7+	2+	0	+0,63	0	-1,6	и~Но ф-, 26,9 ч), "^Тт (э. 3., 7,7 ч)
Т "	9+ 2	0,564	—	2,83	-	1"Тт (э. 3., 9,6 сут), (V, 3,1 ч)
	2+	0	+0,66	0	–	lesTm (э. 3., 85 сут)
0+	2+	0	+0,62	0		Кулоновское возбуждение
2	3+ 2	-0,231	+0,534	0	-1,2	le^Er (р-, 9,4 сут), ""Yb (э. 3., 32 сут)
0+	2+	0	+0,67	0	—2,1	""Тш (Р-, 128,6 сут), i'~Lu (р+, 2,0 сут)
1- " Г "	з~ 2	+0,4919	+0,348	0	-1,59	I'llm (Р-, 1,92 года), l'lLu (э. 3., 8,2 сут)
1- 2	5- 2	+0,4919	+ 1,008	0	—2,21	
0+	2+	0	+0,664	0	-2,16	i~Lu (э. 3., 6,7 сут), "2Тт (р-, 63,6 ч)
0+	2+	0	+0,672	0	-2,14	l'^Lu (э. 3., 3,6 года), (р-, 5,2 мин)
о-"	2+	0	+0,74	0	-2,24	Кулоновское возбуждение
.я · 2	9+ 2	+2,22	+4,26	+5,68		(р-, 4,19 сут), i"Hf (э. 3., 70 сут)
	2+	0		0		"~'~Lu (Р-, 3,7 ч)
7- 2	9- 2	+0,61	+ 1,0			i"Lu (р-, 6,7 сут)
	2+	0	+0,52	0	-1,95	i"Lti (Р-, 28,4 мин), 1"Тй (э. 3., 9,31 мин)
0+	2+	0	+0,63	0	—1,96	180"Та (э. 3., 8,1ч), isomHf (140 сут)
7+ 2	9- 2	+2,356	+5,14	+3,9	+4,4	181W (э. 3., 121,2 суг), i~Hf (8-, 42,4 сут)
2	2	+2,356	–	+3,9	–	–

	содержа-	*c*, KSB	7-1,2.	r, MM/c	*Er.* in-= эВ	"r
	0,14	103,70	1,27	2,077	32,07	3,4
182^	26,41	100,10	1,31	2,086	29,55	3,85
	14,40	46,484	0,184	31,98	6,338	40
183W	14,40	99,079	0,688	4,013	28,79	4,1
184W	30,64	111,21	1.28	1,922	36,08	2,6
isew	28,41	122,30	1,01	2,215	43,17	1,6
"'Re	62,93	134,24	0.010	203,8	51,73	2,266
1830s	1,59	137,16	0,84	2,374	54,29	1,3
1880s	13,30	155,03	0,695	2,539	68,62	0,8
iseos	16,10	36,22	0,50	15,11	3,726	80
issOs	16,10	69,59	1,64	2,397	13,75	8,0
1890s	16,10	95,23	0.23	12,49	25,76	6,7
if'Os	26,40	186,90	0,47	3,114	98,69	0,4
	37,30	82,398	4,02	0,826	19,08	10,7
IMIr	37,30	129,40	0,089	23,75	47,06	2,88

Продолжение табл. 38.1

						Ш"" см!	Сведения о материнском ядре
25,62	0+	2+	0	+0,52	0	-1,82	isomja 8,1 ч), "ORe (э. 3., 2,43 мин)
25,17			0	+0,51	0	-1,81	182Ta (Й-, 115 сут)
5,523	1-2	3-2 "	4-0,12	-0,10	0	-1,5	is^Ta (Э", 5,1 сут), is3Re (э. 3., 71 сут)
8,178	1-2	5-2	+0,12	+0,92	0	-1,63	_
27,40	0+	2^	0	40,58	0	-1.71	i84Re(3, 3., 38 сут), 184Ta (р-, 8,7 ч)
31,46			0	+0,634	0	-1.63	iseRe (э. 3., 90 ч), 18вTa (р-, 10 мин)
5,542	5+2	7+2	+3,200	_	1-2,2	_	23,9 ч)
28,40	0+	2+	0	+0.56	0	-1.5	18фе (р-, 90 ч)
27,96	0+	2+	0	+0,58	0	-1,36	i88Re (р-, 16,8 ч), issir (э. 3., 41 ч)
1,151	3-2	1-2	+0,6565	+0,22	+0,94	0	и!'1г(э. 3., 13,3 сут), i89Re (р-, 24,3 ч)
8,420	3-	5-2	+0,6565	+0,98	+0,94	-0,62	_
0,561	3-2	3-2	+0.6565	_	+0,94	0	_
24.66	0+	2+	0	+0,63	0	-1,18	19»1г(э. 3., 12,1 сут), woRe (Р-, 3,1 мин)
1,540	3+2	2	+0,1453	+0,54	+0,78	0	"Юз (Э-, 15,4 сут), wiPt (э. 3., 2,8 сут)
5,649	2	5-2	+0,1453	+0,55	+0.78	_	_

193 Ir	62,70	73,039	6,30	0,594	14,84	6,5	3,057
183Ir	62,70	138,95	0,080	24,61	54,00	2,26	5,831
lespt	33,80	98,857	0,170	16,28	26,90	7,2	6,106
isept	33,80	129,74	0,620	3,401	46,33	1,8	7,426
W'AU	100	77,345	1,879	1,883	16,30	4,30	3,858
19,Hg	16,84	158,37	2,47	0,699	67,65	0,94	15,08
.oiHg	13,22	32,19	0,20	42,49	2,767	_	0,948
232Xh	0	49,369	0,345	16,06	5,639	319	1,568
23ipa	0	84,24	41,0	0,079	16,49	1,83	4,751
234U	0,0057	43,491	0,266	23,65	4,339	780	0,828
2зеи	0	45,242	0,235	25,73	4,655	845	0,706
23SU	99,27	44,915	0,225	27,07	4,550	660	0,917
=37Np	0	59,537	68,3	0,067	8,028	1,12	30,60
239PU	0	57,26	0,101	47,30	7,364	223	0,770
«»Pu	0	42,824	0,162	39,00	4,100	920	0,724
2«Am	0	84,0	2,34	1,392	15,59	0,218	27,61

S

3+ 2	1 + "2	+0,1583	+0,486	+0,7	0	iMOs (Р-, 30,0 ч)
2	5- 2	+0,1583	-	+0,7		-
1- 2	3- 2	+0,6060	-0,62	0	-	3., 183 сут), Ir (Э-, 2,8 ч)
1- 2	5- 2	+0,6060	+0,90	0	-	-
Л. 2	1+ 2	+0,1448	+0,418	+0,59	0	i9'Pt (р-, 18,3 ч), "'Hg (Э. 3., 64,1 ч)
1- 2	5- 2	+0,506	+ 1,28	0	+0,7	"!»Au (Р-, 3,14 сут), (Э. 3., 7,42 ч)
3- 2	1- 2	-	-	-	0	2»iTl (Э. 3., 73 Ч)
	2+	-	-	-	-	«ви (а, 2,4-10' лет)
3- 2	5- 2	+ 1,98	-	-1,7	f0,8	23iTh 25,5 ч)
0+	2+	-	-	-	-2,39	234mpa 1,17 мин). «•Np(3. 3., 4,4 сут)
0*	2-"	-	-	-	2,96	23i>Np (Э. 3., 22 Ч)
	2+	–	+0,25	+ 10,5	-3,2	2«Pu (а, 3,79.105 лет)
5+ 2	5- 2	+2,5	+ 1,3	+4,1	+4,1	2«Am (а, 458 лет), 23'Pu (Э. 3., 44,63 сут;
	5+ 2	+0,200				2«Cm (а, 30 лет), (р-, 2,36 сут)
0+	2+	-	+0,78	-	-3,3	2«Cm (а, 18,1 года), 2«Np 63 мин)
5- 2	5+ 2	+ 1,58	-	+4,9	+4,9	(Р-, 4,96 Ч), 2«Bk (а, 2,34 НС)

38.3. ПАРАМЕТРЫ МЁССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОВ

В табл. 38.2 приведены для температур 298 и 4,2 К положения линий (мм/с) спектра a-Fe относительно источника Pd^Co) при температуре 298К, а также параметры б, мм/с, Вн, Тл [10], на рис. 38.1 — мёссбауэровские спектры поглощения для ядер "Fe в различных материалах.

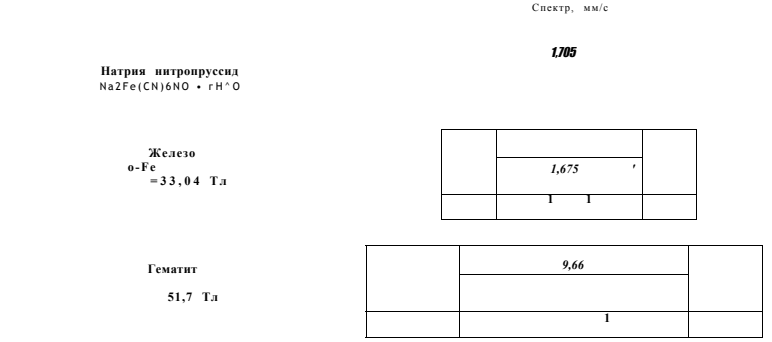


Рис. 38.1. Схематическое изображение мессбауэровских спектров поглощения для ядер '•'Fe при температуре 300 К в различных материалах, используемых в качестве эталонных образцов для градуировки спектрометров [8]

В табл. 38.3 приведены следующие характеристики:

формула химического соединения (сплава), содержащего мессбауэровские ядра в стабильном состоянии (поглотитель);

— температура поглотителя (если не указана, то наиболее вероятна температура 25 "С);

формула химического соединения (сплава), содержащего радиоактивные материнские ядра, или химический символ матрицы, в которую введены атомы материнского изотопа (источник);

Ts — температура источника;

Г — ширина отдельной линии экспериментально наблюдаемого мессбауэровского спектра;

е — максимальный эффект поглощения, определяемый по формуле *b=[Noo)—N[Vo)IIN{oo);* если е приводится с учетом фона от постороннего излучения, рядом с цифрой стоит индекс 0;

б — сдвиг наблюдаемого спектра, отсчитываемый от значения г;=0; б считается положительным в случае движения источника и поглотителя навстречу друг другу (если знак б не указан, наиболее вероятным считается положительное значение);

Д — квадрупольное расщепление;

Вн — индукция магнитного поля, действующего на ядре атомов мессбауэровского изотопа в данном веществе (поглотителе);

***fs, fA* — вероятности излучения и поглощения v квантов без отдачи энергии.**

В табл. 38.4 приведены основные параметры мессбауэровских спектров ядер 237Np в некоторых веществах [11].

Таблица 38.2. Положения линий **спектра a-Fe** для гелиевой температуры и **f = 25 °С**
Источник— кобальт в матрице палладия при температуре 25

т. к	Номер линии и ее положение в спектре, мм/с						6, мм/с	$B_н$, Тл
	1	2	3	4	5	6		
298 4,2	—5,482 —5,501	—3,247 -3,210	-1,013 —0.917	0,662 0,801	2,897 3,095	5,134 5,394	—0,175 —0,056	—330,4 —339,0

Таблица 38.3. Значения параметров мёссбауэровских спектров

Поглотитель		Источник								
Формула	*TA.* к	Формула	*Ts.* к	г. мм/с	••	%MM/G	д, мм/с		*fs*	*fA*
KC1	4,2	KCI (a, *p)*	4,2	11	16	—0,14				—
Fe	4,2		4,2	0,20	36	—0,226		33,0		
Fe	4,2	Ж	4,2			—0,185				
Fe	298	Pt(Co)	298	0^22		—0,347				
Fe	300	Нержавеющая сталь 310 (Co)	300	0,39	Й	-f0,090				
Нержавеющая сталь 310	300	Cr(Co)	300	0,48	21	-f0,05				—
Нержавеющая сталь 310	300	Cu(Co)	300	0,45	45o	-0,32				
Нержавеющая сталь 310	300	Au(Co)	300	0,48		—0,78			0,67	
Нержавеющая сталь 310	300	UO,(Co)	300			0,32				
Нержавеющая сталь 310	300	Нержавеющая сталь 310 (Co)	300	(Ь53						
	300	Cr(Co)	300	0,40	Z	-f0,51	0,40	51,7		-
	300	Нержавеющая сталь 310 (Co)	300			-1-0,47	0,40		-	
KFeS,	298	Pd(Co)	298	0,28	18o	—0,01	0,50		-	-
Na2Fe(CN)6NO • rH^O	296		296			—0,484	1,705			
Na2Fe(CN)BNO • rH^O	296	Pt(S)	300	0,26	21	—0,61	1,712			
Na2Fe(CN)6NO • rH^O	300	Нержавеющая сталь 310	300	0,38	13o	-0,17	1,712			
Ni	80	Ni (кулоновское возбуждение)	80	3,3	4	-	-	-	0,09	0,09
Ni	77	Ni (кулоновское возбуждение)	77	-	-	-	-	9,0	-	-
ZnO	4,2	MgO(Ga)	4,2	0,006		—0,021				
ZnO	4,2	ZnO	4,2		0^2	0				
Ge	77	Ge (кулоновское возбуждение)	77	*TA*	0,64			-		
									0,01	
Ru	88	Ru (Rh)	85	0,37	4o	+0,11			0,14	
Sn	77		77	0,6					0,29	
Sn	77	S"O	77	1,4						
X	300		300	1,0	5					
	300		300	1,4	31				0,70	
						+2,55				
Te	4,2	Te	4,2	5,2	25		7,8			
TeOr	300		77	5,2					0,12	0,07
	20	Z^]	20	4,1		+1,6				
W l O e	100	ZnTe	120	0,87		+0,82				
	77	ZnTe	77			—0,46			0^15	0^29
Nai^»!										
wsXeFa	77	Nal	4,2	21	2	0	42			
i^'XeF,	77	Nal	4,2	9	2	0	42			
Na4i29Xe06	4,2	Nal	4,2	13	5,4					
laXeF^	4,2			6,8		-0,3	6Уо		-	
CsCI	4,2		4,2	1,1	оГЗо	-0,01				
Sm,03		Еи^Оз		4						
isiEu	4,2		4^2			-8,1				
is'EuaOs	77		77		25			Ё	0^54	0^54
EuPd^Sia	292		292	2,41		—8,06	1,23			
			80							
issGd^Os (60 кэВ)	80	ад!		4,3						
«SGd^Oa (86 кэВ)	80		80	1,1	0,56		—	—	0,012	0,012
TbaO	oU		80	ад	2					
«Юу^Оз	300		300	12			—	-	0,10	-

Продолжение табл. 39.1 Продолжение табл. 39. i

Поглотитель		Источник		Г, мм/с	%	мм/с	Д, мм/с		f s	fA
Формула	Гл. К	Формула	К							
	—	Gd,03 (Tb)	300	13	6		—		0,23	
««ЕгзОз	20	H02O3	20	2	2lo	0	–			
Тт		Er,Oз	800	30		+ 5	144	700,0		
		Er,Oз	300	14	4					
"^Yb/Oз	ад	Tm	20		3,5	Ь5,7				
"IYb^Oa	4,2	Er^Oз (Tm)	4,2	11	10		И			
НГгОз	–	Lu,03	–	11	–				0,11	0,04
Ta	–	W	300	0,26	4,5	+0,9				
TaC	300	W	300	0,06	0,6					
l82W	22	Ta	22	2,0	44o	+ 1,3				
	77	Ta	77							
183XV	300	Ta	300	40	4,4	+0,17				
is^WCL	4,2	W(Re)	4,2			—0,10			—	—
186W	4,2	Re	4,2	4,26						
1860s	10	Re	10	3,3	74					
1880s	15	Re	15	7,5	23o				0,02	0,11
1т(CO)зС1,д	4,2	l-31r	4,2	–		-0,04	2,06	–		
mir	91	Os	91	29	1,1				0,07	
isajr	4,2	Os	4,2			+0,6				
Pt	20	Pt(Au)	20		4					0,13
Pt		Cu(Au)	4,2	20	4					
Au	4,2	Pt	4,2	6	80	— 1,2			0,34	0,14
	4,2		4,2	0,37	0,004	+0,1	1,83	–	0,004	o,ow
	4,2		4,2	4,1	0,73	+0,1	7,8			
	25	(кулоновское возбуждение)	30	9,6		+0,08		–	0,31	(Ь35
238U02	4,2		4,2	45	4	+2		270,0		
"^sPuOs	4,2		4,2	5,1	2	0	—			
	4,2	^CmO^	4,2	58	1,2	0,5				
2«Am02	4,2		4,2	22	0,66	0	0	0		
''''NpAl,	4,2	2«Am (Th)	78	1,1	0,04	10			-	-

Таблица 38.4. Значения параметров спектров ядер ^зг^р в некоторых матрицах

Поглотитель	*Т, к*	Источник	*Т,* к	*S.* мм/с	*Bэф.* Тл	Д, мм/с	Г, мм/с
NpOa	4,2		4,2	0			6
	78	S S P J	78	0			3
	78	NpO,(UO,)	78	+5,6	0	0	2
	4,2	NpO, (UO,)	4,2	+6,7	315,0	0,55	
	4,2	Am	4,2	+7,5	4,0		4.1
КЙ	78	Am	4,2		0		3.2
NpO,	78	Am	78	+7,5	0		2,6
NpAl,	78	Am	4,2		0		3,0
NpO,	4,2	Th(Am)	4,2	+3,5	4,0		2,0
NpO,	77	Th(Am)	77	+3,5	0		1,7
NpsOg	77	Th(Am)	77	—2,1	0	1,4	
NpAI,	78	Th(Am)	4,2		0		1,1
NpOs	4,2	Cu(Am)		–			10,8
NpO,	77	Np02(Am0s,)	*'rf*	0	–	-	2,5
NpO,	77		77				1,7
NpO,	77	AmOa—I	77	+ 1,1			
NpO,	77	AтOг—11	77	+25,2			
NPCI4	4,2	NpO,(UO,)		+2,2	260,0	—4,2	
NpCU	77	NpO^CUOa)		+ 1,7	0	8,8	–
NpO.	77	Ат^Оз—I	77	+1,8			
	77	AmgOg—II	77	+28			
NpO^	4,2	AmFg	4,2	—44,6	—	—	—

NpOs	**4,2**		**4,2**	**—40,5**			
	77	**A^cr-'-**	**77**	**—38,5**			
	77	**AmOCl**	**77**	**—35,6**			
NpOa	**4,2**		**4,2**	**—40,9**			
NpO,	**4,2**	Ks|	**4,2**	**+25,0**			
NpOa	**77**	**AmSb**	**4,2**	**+21,0**			
NpO,	**77**	Ат38е4	**4,2**	**+27**			
NpO^	**77**	Ат3Те4	**4,2**	**+29**		**39**	
	77		**4,2**	**—6,5**		**134**	
	77	**Am**	**4,2**	**—7,4 (NpO_2)**	**240,0**		
	4,2		**4,2**	**+2,0 (NpO_2)**			
l i ,	**4,2**		**4,2**	**—0,7 (NpO_2)**			
	4,2	**Th(Ain)**	**4,2**	**—36 (NpO_2)**	**270,0**		
	4,2	**Th(Ani)**	**4,2**	**—46 (NpO_2)**	**230,0**	**5,0**	
KKpOrCOз	**4,2**	**Th(Am)**	**4,2**	**—12 (NpO_2)**	**640,0**	**- 3 ,**	
	4,2	**Th(Am)**	**4,2**	**—17 (NpO_2)**	**680,0**	**2,8**	
	4,2	**Th(Am)**	**4,2**	**—3,21 ($NpAl_3$)**			**1,7**
	4,2	**Th(Am)**	**4,2**	**—2,19 ($NpAl_3$)**	^5,0		**1,7**
к	**4,2**	**Th(Am)**	**4,2**	**+0,76 ($NpAl_3$)**			**1,7**
Г '	**4,2**	**Th(Am)**	**4,2**	**+1,82 ($NpAl_2$)**	**55,0**		**1,7**
	4,2		**4,2**	**—12**	**479,0**	**1,1**	
NpAs	**4,2**			**---**	**470,0**		
	4,2				**470,0**		
K l	**4,2**				**330,0**		
NpP-II	**4,2**				**420,0**		
NpN	**4,2**				**270,0**		
RbNp04	**4,2**	**Am**	**4,2**	**—52,2**		**150**	**3,5**
CsNp04	**4,2**	**Am**	**4,2**	**-52,7**		**138**	**3,2**
CsgNpOs	**4,2**	**Am**	**4,2**	**—58,0**		**81,5**	**2,7**
LisNpOe	**4,2**	**Am**	**4,2**	**—63,2**		**35**	**3,0**
RbsNpOs	**4,2**	**Am**	**4,2**	**—59,0**		**90**	**2,6**
NpAs2	**4,2**	**Am**	**4,2**	**4-3,0 (NpAy**	**288,0**	**23**	**4,5**
	4,2	**Am**	**4,2**	**+41 (NpAb)**		**0,55**	
	4,2	**Am**	**4,2**	**+28 (NpAU)**			
	4,2	**Am**	**4,2**	**+27,5 (NpAl^)**			
	4,2	**Am**	**4,2**	**+ 18,5 (NpAy**	**170,0**		
NpSb^	**4,2**	**Am**	**4,2**	**+ 18(NpAl,)**			
NpSeg	**4,2**	**Am**	**4,2**	+6(NpAl2)			
	4,2	**Am**	**4,2**	—2(NpAl2)			
	4,2	**Am**	**4,2**				
No	**4,2**	**Am**	**4,2**	-3S(NpA!2)			
	4,2	**Am**	**4,2**	—64(NpAl2)			
K,Np04	**4,2**			-57,NPA,,	**109,0**		
	4,2	**Am**	**4,2**		**287,0**		
blNkNpCle-l	**4,2**	**Th(Am)**	**4,2**	**+7,1**	**110,0**	**2,7**	
bNpCL-II	**4,2**	**Th(Am)**	**4,2**	**+7,5**	**101,0**	**3,3**	
, ,„4N]2NpCle	**4,2**	**Th(Am)**	**4,2**	**-6,6**	**137,0**	**0,9**	
Cs2[Np(N03)6]	**4,2**	**Th(Am)**	**4,2**	—4,0(NpAl2)	**107,0**	**—3,3**	
NpRu2			**4,2**	**-17 (NpAl,)**			
Npir,	**4,2**			**-11 (NpAU)**			
NpOs^	**4,2**			**-15 (NpAL)**	**76,0**		
NpCoa	**4,2**			**-22,5**	**90,0**	**—0,4**	
NpNi,	**4,2**			**—17,9**	**230,0**	— 1	
NpFe,	**4,2**			**—24,0**	**167,0**	**—2,8**	
NpMn^	**4,2**			**-20,0**	**40,0**		
NpAlg	**4,2**				**263,0**		
NP3S5-I	**4,2**		**4,2**	— 5	**255,0**		
NP3S5-II	**4,2**		**4,2**	**+28**			

.5. Относительный изомерный сдвиг 6, мм/с, для «'Fe (a-Fe)

Источник	Поглотитель											
	ННП	Cr	Нержавеющая сталь	НФЦ	КФЦ	*a-Fe*	Rh	Pd 1	Cu j	Pt 1		
ННП	**0**	**0,107**	**0,173**	**0,188**	**0,232**	**0,265**	**0,354**	**0,436**	**0,480**	**0,612**	**0,629**	
Cr	**—0,107**	**0**	**0,066**	**0,081**	**0,125**	**0,158**	**0,247**	**0,329**	**0,373**	**0,505**	**0,522**	
Нержавеющая сталь	**—0,173**	**—0,066**	**0**	**0,015**	**0,059**	**0,092**	**0,180**	**0,263**	**0,307**	**0',438**	**0,456**	
НФЦ	**—0,188**	**—0,081**	**—0,015**	**0**	**0,044**	**0,076**	**0,165**	**0,248**	**0,292**	**0,423**	**0,440**	
КФЦ	**—0,232**	**—0,125**	**—0,059**	**—0,044**	**0**	**0,033**	**0,121**	**0,204**	**0,248**	**0,379|**	**0,397**	
a-Fe	**-0,265**	**—0,158**	**—0,092**	**—0,076**	**—0,033**	**0**	**0,089**	**0,171**	**0,215**	**0,3471**	**0,364**	
Rh	**-0,354**	**—0,247**	**—0,180**	**-0,165**	**—0,121**	**-0,089**	**0**	**0,083**	**0,127**	**0,2581**	**0,275**	
Pd	**-0,436**	**-0,329**	**—0,263**	**—0,248**	**—0,204**	**—0,171**	**-0,083**	**0**	**0,044**	**0,175**	**0,193**	
Cu	**—0,480**	**-0,373**	**-0,307**	**—0,292**	**—0,248**	**—0,215**	**—0,127**	**—0,044**	**0**	**0,131**	**0,149**	
Pt	**—0,612**	**—0,505**	**—0,438**	**-0,423**	**—0,379**	**—0,347**	**—0,258**	**-0,175--0,131**		**0 1**	**0,017**	
a-Fe^Oз	**—0,629**	**—0,522**	**—0,456**	**—0,440**	**-0,397**	**—0,364**	**—0,275**	**-0,193--0,149|--0,017|**			**0**	

1 е. ННП — натрия нитропруссид, НФЦ — натрия ферроцианид, КФЦ — калия ферроцианид.

38.4. ИЗОМЕРНЫЙ СДВИГ

В табл. 38.5—38.21 приведены относительные изомерные сдвиги б для ядер резонансного изотопа в материалах, используемых в качестве стандартных источников и эталонных поглотителей [12—14]. Для каждого изотопа в скобках указан стандартный эталон.

Таблица 38.6. Относительный изомерный сдвиг, мм/с, В для ssRu(Ru)

источник	Поглотитель		
	RuO,	Ru	Ru(Rh)
RuOa	**0**	**0,25**	**0,26**
Ru	**—0,25**	**0**	**0,006**
Ru(Rh),	**—0,26**	**—0,006**	**0**

Таблица 38.7. Отиосительный изомерный сдвиг В, мм/с, для ii8Sn(Sn02)

Источник	Поглотитель								
	SnO,	Me,SnF,	V(Sn)	Pd(Sn)	PdaSn	MgsSn	a-Sn	p-sn	SnTe
ЗпОг	**0**	**1,29**	**1,58**	**1,59**	**1,76**	**1,86**	**2,02**	**2,54**	**3,46**
MeSnFz	**—1,29**	**0**	**0,29**	**0,30**	**0,47**	**0,57**	**0,73**	**1,26**	**2,17**
V(Sn)	**—1,58**	**—0,29**	**0**	**0,01**	**0,18**	**0,28**	**0,44**	**0,96**	**1,88**
Pd(Sn)	**—1,59**	**—0,30**	**—0,01**	**0**	**0,17**	**0,27**	**0,43**	**0,95**	**1,87**
	-1,76	**—0,47**	**—0,18**	**-0,17**	**0**	**0,10**	**0,26**	**0,78**	**1,70**
MgaSn	**-1,86**	**-0,57**	**—0,28**	**-0,27**	**—0,10**	**0**	**0,16**	**0,682**	**1,60**
a-Sn	**—2,02**	**—0,73**	**—0,44**	**—0,43**	**—0,26**	**—0,16**	**0**	**0,52**	**1,44**
P-Sn	**—2,54**	**—1,26**	**—0,96**	**—0,95**	**—0,78**	**—0,682**	**—0,52**	**0**	**0,92**
SnTe	**-3,46**	**—2,17**	**—1,88**	**-1,87**	**-1,70**	**-1,60**	**-1,44**	**—0,92**	**0**

SnOs, CaSnOj и BaSnOj экспериментально идентичны.

Таблица Относительный изомерный сдвиг для i"Sb(InSb)

Источник	Поглотитель			
	P-Sn	InSb		SnO,
P-Sn	**0**	**2,6**	**4,3**	**11,1**
InSb	**—2,6**	**0**	**1,67**	**8,55**
NiMSn^Bg	**-4,3**	**-1,67**	**0**	**6,88**
SnOj	**—11,1**	**-8,55**	**-6,88**	**0**

Таблица 38.9. Относительный изомерный сдвиг В, мм/с, для «bTe(ZnTe)

Источник	Поглотитель					
	p-TeO,	Cu(Sb)	Cu(l)	ZnTe	SnTe	PbTe
p-TeOз	**0**	**1,07**	**1,11**	**1,14**	**1,2**	**1,31**
Cu(Sb)	**—1,07**	**0**	**0,04**	**0,07**	**0,1**	**0,24**
	—1,11	**-0,04**	**0**	**0,03**	**0,1**	**0,19**
	—1,14	**—0,07**	**—0,03**	**0**	**0,1**	**0,17**
SnTe	**-1,2**	**—0,1**	**—0,1**	**—0,1**	**0**	**0,1**
PbTe	**—1,31**	**-0,24**	**—0,19**	**-0,17**	**—0,1**	**0**

Таблица 38.10. Относительный изомерный сдвиг 5, мм/с, для

Источник	Поглотитель				
	ZnTe	Csl	Nal	KI	Cul
ZnTg	0	0.12	0,14	0,16	0,28
Csl	—0,12	0	0,02	0,04	0,16
Nal	—0,14	—0,02	0	0,02	0,14
KI	—0,16	-0,04	—0,02	0	0,13
Cui	—0,28	-0,16	—0,14	-0,13	0

Таблица 38.11. Относительный изомерный сдвиг 6, мм/с. для 129I(CUI)

Источник	Поглотитель				
	Nal	KI	Cul	Csl	ZnTe
Nal		0,01	0,05	0,08	0,45
KI	—0,01	0	0,04	0,07	0,44
Cul	-0,05	—0,04	0	0,03	0,41
Csl	—0,08	-0,07	—0,03	0	0,38
ZnTe	—0,45	—0,44	-0,41	-0,38	0

[ца 38.12. Относительный изомерный сдвиг 6, мм/с, для M98т(5тРз)

	Поглотитель			
	EuFa	Еи,Оз	SmFs	Fm,0.
EuFs	0	0,01	0,01	0,04
	—0,01	0	0,00	0,03
Н е	—0,01	0,00	0	0,03
Sm^Os	—0,04	—0.03	-0,03	0

38.13. Относительный изомерный виг Б, мм/с, для 1"Еи(ЕиРз)

	1	гГ	1	Ч, Щ ы	f	f
EuS	0 •	11,45	11,50	11,53	12,52	12,56
SmFs	—11,45	0	0,05	0,09	1,07	1,11
EuFs	—11,50	—0,05	0	0,038	1,024	1,06
EuFg•2H2O	—11,53	-0,09	—0,038	0	0,98	1,02
E u A	—12,52	—1,07	—1,024	—0,98	0	0,04
	—12,56	—1,11	—1,06	—1,02	-0,04	0

Smfis

38.14. Относительный изомерный сдвиг
Таблиц; мм/с, для «зЕи(ЕиРз)

Источник	Поглотитель			
		5т,Оз	EuFa	EuS
Еи,Оз	0	0,25	1,2	15,2
Sm^Oa	—0,25	0	0,9	15,0
ЕиРз	—1,2	—0,9	0	14,0
EuS	—15,2	—15,0	-14,0	0

Таблица 38.15. Относительный изомерный сдвиг 8, мм/с, для «5Cd(CdFg)

Источник	Поглотитель			
	Pd(Eu)	Gd	SuiAljCEu)	GdFa
Pd(Eu)	0	0,07	0,53	0,66
Gd	—0,07	0	0,46	0,59
5тА1з(Еи)	—0,53	—0,46	0,0	0,14
GdFg	—0,66	—0,59	—0,14	0

Таблица 38.16. Относительный изомерный сдвиг мм/с, для "iDyCDyF,)

Источник	Поглотитель					
	DyF,	GdFaCTb)	оа,Оз(ть)		Gd (Tb)	Dy
CyP3	0	0,2	0,5	0,67	2,26	2,9
GdP3(Tb)	—0,2	0	0,3	0,5	2,1	2,7
Gd203(Tb)	-0,5	—0,3	0	0,1	1,7	2,4
	—0,67	—0,5	—0,1	0	1,6	2,21
Gd(Tb)	-2,26	-2,1	—1,7	-1,6	0	0,62
Dy	—2,9	-2,7	—2,4	—2,21	-0,62	0

Таблица 38.17. Относительный изомерный сдвиг 6, мм/с, для "OYb(YbAU

Источник	Поглотитель						
	YbB_6	Yb	$YbAl_2$	TmB_{12}	$TmAl_2$	$YbAl_3$	Tm
YbB_6	0	0,18	0,19	0,22	0,26	0,30	0,35
Yb	—0,18	0	0,02	0,04	0,09	0,12	0,17
$YbAl_2$	—0,19	—0,02	0	0,02	0,07	0,10	0,15
TmB_{12}	—0,22	—0,04	—0,02	0	0,05	0,08	0,13
$TmAl_2$	—0,26	—0,09	—0,07	—0,05	0	0,03	0,08
$YbAl_3$	—0,30	—0,12	—0,10	—0,08	—0,03	0	0,05
Tm	—0,35	—0,17	—0,15	—0,13	—0,08	—0,05	0

38.18. Относительный изомерный сдвиг д. мм/с, для 1MTa{Ta)

Источник	Поглотитель		
	Mo<W)	w	Ta
Mo(W)	0	21,8	22,6
W	—21,8	0	0,835
Ta	-22,6	—0,835	0

Таблица 38.19. Относительный изомерный сдвиг В, мм/с, для «3Ir(Ir)

Источник	Поглотитель			
	Pt	Ir	Os	V(Os)
Pt	0	0,645	1,183	2,34
Ir	—0,645	0	0,539	1,70
Os	— 1,183	—0,539	0	1,16
V(Os)	-2,34	—1.70	—1,16	0

Таблица 38.20. Относительный изомерный сдвиг 8 гранецентрированной кубической решетки Au при 4,2 К мм/с, для is'Au(Au)

Источник	Поглотитель	
	Au	Pt
Au	0	1,23
Pt	-1,23	0

Таблица 38.21. Относительный изомерный сдвиг 6, мм/с, для 237Np(NpAU)

Источник	Поглотитель			
	Am	Th(Am)	NpO,	NpAl,
Am	0	4,0	7,5	13,8
Th(Am)	-4,0	0	3,5	9,8
NpOs	-7,5	—3,5	0	6,3
NpAl,	-13,8	-9,8	-6,3	0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химические применения мессбауэровской спектроскопии: Сб. статей: Пер. с англ./Под ред. В. И. Гольданского. Ч. I. Химические применения. В. В. Храпова. М.: Мир, 1970.

2. Быков Г. М., Фам Зуй Хиен//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1962. Т. 43, № 3. С. 909—918.

3. Вертхейм Г. Эффект Мессбауэра: Пер. с англ./ /Под ред. В. В. Скляревского. М.: Мир, 1966 •

4. Шпинель В. С. Резонанс гамма-излучений в кристаллах. М.: Мир, 1969.

5. Иркаев В. С., Кузьмин Р. Н., Опаленко А. А. Ядерный гамма-резонанс. М.: Изд-во МГУ. 1970.

6. Суздалев И. П. Динамические эффекты в гамма-резонансной спектроскопии, М. Атомиздат, 1979.

7. Shirley D. A.//Rev. Mod. Phys. 1964. Vol. 36. P. 339—352.

8. Muir A. H., Ando K. J., Coogan H. M. Mossbauer Effect Data Index 1958—1965. N. Y. — London—Sydney: Interscience Publ., 1966.

9. Stevens J. G., Stevens V. E. Mossbauer Effect Data Index, covering the 1976 literature. N. Y.: Plenum Press, 1978.

10. Violett C.E., Pipkorn D. N.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42, N 11. P. 4339-4342.

11. Бескровный А. И., Лебедь Н. А., Остапенко Ю. М.: Proc. of the Conf. on Mossbauer Spectrometry. Dresden. 1971. Vol. 2. P. 583—586.

12. Ruby S. L. e. a.//Phys. Rev. 1969. Vol. i84. P. 374—382.

13. Stevens J. G., Gettis W. L. Isomer Shift Reference Scales: Intern. Conf. Mossbauer Effect. Jaipur, India, 1981.

14. Kalvius G. M., Wagner F. E., Potzel W.//J. de Phys. Colloq. C-6. 1976. Vol. 97. P. 657—671.

Глава 39

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

В. П. Рудаков

39.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В ядерной физике в настоящее время принято различать два класса микрообъектов: атомные ядра и элементарные частицы. Атомными ядрами называют объекты, состоящие из протонов и нейтронов и имеющие массовое число два и более. Все остальные микрообъекты относят к элементарным частицам. Если не требуется специальных уточнений, то и атомные ядра, и элементарные частицы называют микрочастицами или просто частицами.

Ядерной реакцией называют процесс взаимодействия элементарной частицы с ядром или ядер друг с другом. Обычно ядерную реакцию записывают в виде

$$a + B \to f + b$$

или сокращенно

$$A(a, b)$$

Такая запись означает, что в начальной стадии реакции (во входном канале) взаимодействуют две частицы *А* и *а,* в результате чего в конечной стадии (выходном канале) появляются частицы *В и Ь.* Эти частицы могут быть теми же, что и во входном канале (упругое рассеяние); они могут быть теми же частицами, что и во входном канале, но в других внутренних состояниях (неупругое рассеяние); наконец, это могут быть другие частицы и в общем случае их может быть не две, а несколько.

Каждая ядерная реакция описывается двумя основными характеристиками: вероятностью ее протекания и энергетикой, т. е. количеством поглощаемой или выделяемой энергии.

Вероятность ядерной реакции описывается *сечением.* Единица сечения — квадратный метр или любая его дольная единица, например Ю"®" м2=1 фм^. Раньше для сечения использовалась внесистемная единица барн; 1 б = 10-2S м2.

Дифференциальное сечение реакции — это величина, пропорциональная вероятности вылета данной частицы — продукта реакции под определенным углом (относительно направления движения частицы, вызвавшей реакцию) и с данной энергией. Эта величина обозначается da/dQ и выражается в единицах м^/ср. Интеграл от дифференциального сечения по полному телесному углу дает полное сечение.

Сечение реакции определяется в конечном счете свойствами сил взаимодействия между частицами и в настоящее время может быть точно рассчитано только для упругого рассеяния в кулоновском поле (резерфордовское рассеяние). Расчет сечений всех остальных разнообразнейших реакций ведется в рамках различных моделей и дает лишь оценочные данные.

Библиография по исследованиям конкретных ядерных реакций и схемы уровней ядер периодически публикуются в журналах Nuclear Data Sheets и Nuclesr Physics.

39.2. СЕЧЕНИЕ РЕЗЕРФОРДОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Дифференциальное сечение резерфордовского рассеяния rfo/dQ, фм^/ср, нерелятивистской частицы с массой *m*, зарядом *ze* и энергией *E* на ядре с массой M и зарядом *Ze* вычисляется по формуле

M

где *E* — энергия падающей частицы в лабораторной системе координат (ЛСК), МэВ; G — угол рассеяния в системе центра масс (СЦМ),

Это же сечение в ЛСК получается, если вместо csc^(e/2) подставить csc«(il5/2)—2(m/M)2-f .... где угол \|) отсчитывается в ЛСК. Следующий член разложения в скобках имеет порядок *(m/M)*.*

39.3. ЭНЕРГИЯ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Энергетические соотношения в ядерной реакции определяются законами сохранения энергии и импульса.

Энергией реакпии *A(a. Ь)B* называется величина

где Mi — массы участвующих реакции частиц; *c* — скорость света.

Для вычисления *Q* обычно пользуются не марсами ядер, а дефектами масс. Дефектом массы называют величину где *M* — реальная масса частицы (атома); *A* — так называемое массовое число, суммарное число нуклонов (протонов и нейтронов) в атомном ядре. Если M выражать в атомных единицах массы (а.е.м.) и числу *A* приписать ту же единицу, то и ЛМ получится в а.е.м. Одна а.е.м. равна 1/12 массы нуклида '^C и составляет 1,6605655-10-2' кг. Для вычисления энергии реакции ДМ удобнее выражать в килоэлектрон-вольтах: а.е.м.=931501,59 кэВ.

Смысл использования дефекта масс заключается • в том, что при расчетах можно оперировать числами во много раз меньшими, чем массы ядер или энергии связи:

Q = (ДМ^ -f AM^) - (AMd + ДМй).

Значения дефектов масс приведены в табл. 39,1.

Таблица 39.1. Дефекты масс ***Ш = M — A,*** **кэВ[1]** (**Л'**—число нейтронов; **Z** — число протонов; ***A=N+Z*** ~ массовое число; с — масса получена в результате интерполяции или экстраполяции на основе имеющейся систематики)

N	*Z*	*A*	Элемент	Дефект массы, кэВ
1	**0**	**1**	*n*	**8071,431 (39)**
0	**1**		**H**	**7289,034 (23)**
	1	**2**	**H**	**13 135,84 (4)**
2	**1**	**3**	**и**	**14 949,94 (5)**
1	**2**		**He**	**14 931,32 (5)**
3	**1**	**4**	**H**	**25 920 (500)**
2	**2**		**H**	**2424,94 (4)**
1	**3**		**Li**	**25 130 (300)**
4	**1**	**5**	**H**	**33 790 (£00)**
3	**2**		**He**	**11 390 (50)**
2	**3**		**Li**	**11 680 (50)**
4	**2**	**6**	**He**	**17 597,0 (35)**
3	**3**		**Li**	**14 087,3 (8)**
2	**4**		**Be**	**18 375 (6)**
5	**2**	**7**	**He**	**26 111 (30)**
4	**3**		**Li**	**14 908,2 (9)**
3	**4**		**Be**	**15 770,1 (9)**
2	**5**		**B**	**29 940 (100)**
6	**2**	**8**	**He**	**31 609 (12)**
5	**3**		**Li**	**20946,9 (9)**
4	**4**		**Be**	**4941,76(10)**
3	**5**		**B**	**22 921,9 (13)**
2	**6**		**C**	**35 085 (25)**
6	**3**	**9**	**Li**	**24 954,8 (20)**
5	**4**		**Be**	**11 348,0 (4)**
4	**5**		**B**	**12416,1 (10)**
3	**6**		**C**	**28 912,1 (39)**
7	**3**	**10**	**Li**	**33 830 (250)**
6	**4**		**Be**	**12 607,6 (6)**
5	**5**		**B**	**12 051,7 (5)**
4	**6**		**C**	**15 702,9 (7)**
3	**7**		**N**	**39 500 (c)**
8	**3**	**11**	**Li**	**40 940 (120)**
7	**4**		**Be**	**20 176 (6)**
6	**5**		**B**	**8667,9 (4)**
5	**6**		**C**	**10 650,0 (11)**
4	**7**		**N**	**25 230 (100)**
8	**4**	**12**	**Be**	**25 030 (40)**
7	**5**		**B**	**13 369,5 (13)**
6	**6**		**C**	**0,0 (0,0)**
5	**7**		**N**	**17 338 (1)**
4	**8**		**O**	**32070 (260)**
9	**4**	**13**	**Бе**	**34 900 (c)**
8	**5**		**B**	**16 562 (4)**
7	**6**		**C**	**3125,038 (1«)**
6	**7**		**N**	**5345,6 (9)**
5	**8**		**O**	**23 105 (10)**
10	**4**	**14**	**Be**	**40 970 (c)**
9	**5**		**B**	**23 657 (30)**
8	**6**		**C**	**3019,922(24)**
7	**7**		**N**	**9863,444 (23)**
6	**8**		**0**	**8008,3 (5)**
5	**9**		**F**	**33 610 (c)**
10	**5**	**15**	**B**	**29 530 (c)**
9	**6**		**C**	**9873,2 (8)**
8	**7**		**N**	**101,514 (35)**
7	**8**		**O**	**2855,4 (7)**
6	**9**		**F**	**17 660 (c)**
И	**5**	**16**	**B**	**38 000 (c)**
10	**6**		**C**	**13 693 (16)**

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
9	7		N	5681,6 (23)
8	8		O	—4737,02 (4)
7	9		F	10 692 (14)
6	10		Ne	24 ИО (140)
12	5	17	B	45270 (c)
11	6		C	**21 060 (c)**
10	7		N	**7870 (15)**
9	8		O	—809,9 (8)
8	9		F	1951,66 (18)
7	10		Ne	16478 (26)
12	6	18	C	25 370 (c)
И	7		N	13 274 (30)
10	8		O	—783,03(30)
9	9		F	872,5 (7)
8	10		Ne	5319 (5)
7	И		Na	25 320 (c)
13	6	19	C	34 430 (c)
12	7		N	15600 (300)
11	8		O	3331,4 (27)
10	9		F	-1487,33 (13)
9	10		Ne	1750,9 (6)
8	И		Na	12 930 (12)
13	7	20	N	**22 200 (c)**
12	8		O	**3799 (8)**
11	9		F	**-17,1 (6)**
10	10		Ne	-7043,0 (5)
9	11		Na	6844 (7)
8	12		Mg	**17 568 (27)**
14	7	21	N	**26950 (c)**
13	8		O	8120 (80)
12	9		F	-47 (7)
11	10		Ne	**—5733,1 (11)**
10	II		Na	**-2185,8 (7)**
9	12		Mg	10 912 (16)
И	8	22	O	9490 (220)
13	9		F	2826 (30)
12	10		Ne	—8026,1 (5)
11	11		Na	—5184,0 (7)
10	12		Mg	**—394,1 (19)**
9	13		Al	**18 210 (c)**
15	8	23	O	17 950 (c)
14	9		F	3350 (170)
13	10		Ne	-5155,1 (21)
12	II		Na	—9529,6 (8)
И	12		Mg	—5470,6 (15)
10	13		Al	6768 (25)
15	9	24	F	8650 (c)
14	10		Ne	-5949 (10)
13	И		Na	-8417,5 (8)
12	12		Mg	—13 930,6 (7)
11	13		Al	-52 (4)
10	14		Si	10 740 (120)
16	9	25	F	12 840 (c)
15	10		Ne	—2150 (90)
14	11		Na	—9357 (7)
13	12		Mg	—13190,8 (11)
12	13		Al	—8912,9 (11)
11	14		Si	3824 (10)
16	10	26	Ne	-190 (c)
15	11		Na	-6888 (23)
14	12		Mg	-16212,4 (9)
13	13		Al	—12 207,6 (10)
12	14		Si	-7143,1 (31)
11	15		P	11 260 (C)

Продолжение табл. 39. i

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
17	10	27	Ne	6670 (c)
16	И		Na	—5630 (80)
15	12		Mg	—14 585,0 (14)
14	13		Al	-17 194,3 (7)
13	14		Si	—12 385,3 (15)
12	15		P	-590 (c)
17	11	28	Na	—ИЗО (120)
16	12			**—15016,4 (22)**
15	13			**-16848,2 (8)**
14	14		Si	—21 491,2 (6)
13	15		P	-7159,5 (38)
12	16		S	4190 (120)
18	И	29	Na	2660 (150)
17	12		Mg	—10 750 (50)
16	13		Al	-18212 (5)
15	14		Si	-21893,7 (8)
14	15		P	—16 949,3 (18)
13	16		S	**—3160 (50)**
19	11	30	Na	**8380 (300)**
18	12		Mg	—9790 (c)
17	13		Al	—15 890 (40)
16	14		Si	—24 431,7 (9)
15	15		P	—20 204,5 (27)
14	16		S	—14 062,0 (31)
13	17		CI	4840 (c)
20	11	31	Na	10 610 (c)
19	12			—3900 (c)
18	13			—15100 (100)
17	14		Si	—22 948,7 (10)
16	15		P	—24 439,5 (6)
15	16		S	—19 044,1 (16)
14	17		CI	—7070 (50)
21	11	32	Na	16 410 (c)
20	12			-2890 (c)
19	13		Al	—11 290 (c)
18	14		Si	-24 092 (7)
17	15		P	-24 304,7 (8)
16	16		S	—26015,1 (6)
15	17		CI	-13 329 (8)
14	18		Ar	—2210 (130)
21	12	33		4130 (c)
20	13			—9370 (c)
19	14		Si	—20 570 (50)
18	15		P	—26 336,9 (21)
17	16		S	-26585,9 (8)
16	17		CI	—21 003,0 (9)
15	18		Ar	-9385 (30)
21	13	34	Al	
20	14		Si	**-20%0%)**
19	15		P	**—24 550 (50)**
18	16		S	**-29 931,25 (28)**
17	17		CI	**—24 438,3 (8)**
16	18		Ar	**—18 379,2 (30)**
15	19		K	—1480 (c)
22	13	35	Al	-840 (c)
21	14		Si	—15 040 (c)
20	15		P	—24 940 (80)
19	16		S	—28 846,27 (21)
18	17		CI	**—29 013,73 (10)**
17	18		Ac	**—23048,9 (16)**
16	19		K	—И 169 (20)
22	14	36	Si	—12 670 (c)
21	15		p	—20 770(c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
20	16		S	—30 665,3 (15)
19	17		Cl	—29 521,77 (21)
18	18		Ar	—30 231,32 (28)
17	19		K	—17 426 (
16	20		Ca	—6650 (2
23	14	37	Si	—7010 (c)
22	15		P	—19 010 (c)
21	16		S	-26908 (30)
20	17		Cl	—31 761 16 (13)
19	18		Ar	—30 947,9 (6)
18	19		K	—24 799,4 (14)
17	20		Ca	—13 164 (39)
23	15	38	P	—14 560 (
22	16		S	—26862 (a
21	17		Cl	—29 798,0 (4,)
20	18		Ar	—34 715,0 (8:
19	19		K	-28 802,0 (16)
18	20		Ca	—22 060 (9)
17	21		Sc	—4460 (c)1
24	15	39	P	—12 300 (|c)
23	16		S	—23000 (c)
22	17		Cl	-29 803 (18)
21	18		Ar	—33 241 (5
20	19		K	—33 806,;r (8)
19	20		Ca	—27 282 (5)
18	21		Sc	—14 080 (c)
24	16	40	S	—22240 (c)
23	17		Cl	—27 540 (
22	18		Ar	—35 040,54 7
21	19		K	—33 535,2 (8
20	20		Ca	—34 846,f? (8)
19	21		Sc	—20 527 (4)
18	22		Ti	—9040 (2i30)
25	16	41	s	—18 100 (c)
24	17		Cl	—27400 (160)
23	18		Ar	—33 067,7 (9)
22	19		K	-35 559,7 (9)
21	20		Ca	-35 138,5 (9)1
20	21		Sc	—28 643,5 (16)
19	22		Ti	—15780 (40)
25	17	42	Cl	-24 420 (c)
24	18		Ar	—34 420 (•40)
23	19		K	—35 022,«^ (13)
22	20		Ca	—35 543,9 (14)
21	21		Sc	—32 120,7 (16)
20	22		Ti	—25 122 (6)
19	23		V	—8020 (c)
26	17	43	Cl	-23 140 (60)
25	18		Ar	—31 980 (70)
24	19		K	—36 588 (10)
23	20		Ca	—38405,4 (14)
22	21		Sc	—36 185,0 (24)
21	22		Ti	—29 324 (7)
20	23		V	—18 020 (
26	18	44	Ar	—32 271 (a,
25	19		K	—35 807 39)
24	20		Ca	-41 466,((14)
23	21		Sc	37 810,7 (24)
22	22		Ti	-37 546,2 (31)
21	23		V	-23 850 (c)
20	24		Cr	-13 500 130)
27	18	45	Ar	-29 730 60)
26	19		K	—36611 H)

Продолжение табл. 39. i

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
25	20		Ca	—40 809,6 (15)
24	21		Sc	—41 066,5 (14)
23	22		Ti	—39 004,0 (28)
22	23		V	—31 879 (27)
21	24		Cr	—19 460 (150)
28 ^	18	46	Ar	—29 730 (70)
27	19		K	—35 420 (16)
26	20		Ca	—43 138,2 (37)
25	21		Sc	—41 755,6 (15)
24	22		Ti	—44 122,7 (14)
23	23		V	—37070,8 (18)
22	24		Cr	—29 461 (30)
21	25		Mn	—12 470 (c)
28	19	47	K	—35 698 (8)
27	20		Ca	—42 342,9 (37)
26	21		Sc	—44 330,5 (24)
25	22		Ti	—44 931,0 (15)
24	23		V	—42 001,1 (17)
23	24		Cr	—34 618 (25)
22	25		Mn	—22 920 (c)
29	29	48	K	—32 220 (500)
28	20		Ca	—44 216 (4)
27	21		Sc	—44 498 (6)
26	22		Ti	—48 487,7 (14)
25	23		V	—44 472,8 (31)
24	24		Cr	—42 818 (7)
23	25		Mn	—29 170 (c)
29	20	49	Ca	—41 286 (5)
28	21		Sc	—46 555 (4)
27	22		Ti	—48 558,7 (14)
26	23		V	—47 956,9 (16)
25	24		Cr	—45 329,0 (26)
	25		Mn	-37 613 (24)
23	26		Fe	-24 470 (160)
30	20	50	Ca	-39 572 (8)
29	21		Sc	—44 539 (16)
28	22		Ti	—51432,1 (26)
27	23		V	—49 219,3 (16)
26	24		Cr	—50 258,0 (14)
25	25		Mn	—42 625,7 (17)
24	26		Fe	—34 430 (c)
30	21	51	Sc	—43220 (20)
29	22		Ti	-49 733,0 (28)
28	23		V	-52 199,1 (14)
27	24		Cr	—51 447,8 (14)
26	25		Mn	-48 239,8 (14)
25	26		Fe	-40 228 (17)
24	27		Co	—27 230 (c)
31	21	52	Sc	—40 140 (c)
30	22		Ti	-49 469 (10)
29	23		V	—51 438,9 (17)
28	24		Cr	—55415,3 (15)
27	25		Mn	—50 704,2 (24)
26	26		Fe	-48 332 (12)
25	27		Co	—34 230 (c)
31	22	53	Ti	—46 890 (100)
30	23		V	—51 863 (25)
29	24		Cr	—55 283,7 (16)
28	25		Mn	—54 687,4 (15)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
27	26		Fe	—50 944,2 (22)
26	27		Co	—42 640 (18)
25	28		№	—29 410 (180)
32	22	54	Ti	—45 330 (c)
31	23		V	**—49 930 (100)**
30	24		Cr	**—56931,3 (16)**
29	25		Mn	—55 554,3 (18)
	26		Fe	—56 251,4 (14)
27	27		Co	- 48 009,6 (19)
26	28		Ni	—39210 (c)
32	23	55	V	**—49 010 (c)**
31	24		Cr	**—55 106,3 (17)**
30	25		Mn	—57 710,0 (16)
29	26		Fe	- 57 478,6 (15)
28	27		Co	- 54 023,9 (16)
27	28		Ni	- 45 334 (H)
26	29		Cu	—31 530 (c)
33	23	56	V	—46 210 (c)
32	24		Cr	—55265 (30)
31	25		Mn	—56908,8 (17)
30	26		Pe	- 60604,1 (14)
29	27		Co	- 56036,7 (24)
28			Ni	- 53 902 (11)
27	29		Cu	—38 500 (c)
33	24	57	Cr	—52 790 (c)
32	25		Mn	- 57 487 (8)
31	26		Fe	—60 179,0 (14)
30	27		Co	- 59 342,4 (15)
29	28		Ni	—56099 (7)
28	29		Cu	—47620 (c)
27	30		Zn	—32 630 (130)
34	24	58	Cr	- 52 050 (c)
33	25		Mn	—56210 (100)
32	26		Fe	—62 151,8 (16)
31	27		Co	—59 844,0 (18)
30	28		Ni	- 60 224,3 (15)
29	29		Cu	- 51661,7 (28)
28	30		Zn	—42 260 (c)
34	25	59	Mn	- 55 478 (30)
33	26		Fe	- 60661,4 (26)
32	27		Co	—62226,4 (15)
31	28		Ni	- 61 152,9 (15)
30	29		Cu	—56 352,2 (21)
29	30		Zn	—47 590 (c)
35	25	60	Mn	- 52 950 (c)
34	26		Fe	- 61 437 (10)
33	27		Co	—61 646,6 (15)
32	28		Ni	—64 470,2 (15)
31	29		Cu	—58 343,3 (25)
30	30		Zn	—54 184 (И)
35	26	61	Fe	**—59 010 (70)**
34	27		Co	**—62 897,0 (17)**
33	28		Ni	—64 219,1 (15)
32	29		Cu	—61980,7 (20)
31	30		Zn	—56 580 (200)
30	31		Ga	—47 750 (c)
36	26	62	Fe	—58 930 (50)
35	**27**		Co	**—61 504 (14)**
34	**28**		Ni	**—66745,4 (15)**
33	29		Cu	—62 796 (5)

Продолжение табл. 39. i

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
32	30		Zn	—61 169 (10)
31	31		Ga	—51 770 (c)
37	27	63	Co	**—61850 (19)**
36	28		Ni	**- 65 512,6 (115)**
35	29		Cu	—65 578,5 (15)
34	30		Zn	—62 211,1 (22)
33	31		Ga	—56690 (100)
32	32		Ge	—47 550 (c)
37	27	64	Co	- 59 791 (20)
36	28		Ni	**—67 097,9 (16)**
35	29		Cu	**- 65423,0 (17)**
34	30		Zn	—66001,2 (19)
33	31		Ga	—58 836 (8)
32	32		Ge	—54 430 (250)
37	**28**	65	Ni	—65124,5 (17)
36	**29**		Cu	—67261,5 (20)
35	30		Zn	—65909,6 (20)
34	31		Ga	—62 653,8 (22)
33	32		Ge	—56410 (100)
32	33		As	—47 150 (c)
38	**28**	66	Ni	—66021 (19)
37	**29**		Cu	—66256,7 (21)
36	**30**		Zn	—68 898,3 (16)
35	31		Ga	—63 723,3 (34)
34	32		Ge	
33	33		As	—51 520 (c)
39	28	**67**	Ni	—63 470 (90)
38	29		Cu	—67 305 (8)
37	30		Zn	—67 879,6 (16)
36	31		Ga	—66878,5 (18)
35	32		Ge	—62 450 (50)
34	33		As	—56 650 (c)
33	34		Se	—47 080 (c)
39	29	68	Cu	—65390 (50)
38	30		Zn	—70006,3 (17)
37	**31**		Ga	—67 085,2 (21)
36	**32**		Ge	—66 972 (12)
35	**33**		As	—58 770 (c)
34	34		Se	—54 170 (c)
40	**29**	69	Cu	—65 940 (70)
39	**30**		Zn	**—68417,0 (18)**
38	**31**		Ga	**—69 321,5 (31)**
37	**32**		Ge	**—67 096 (4)**
36	33		As	—63 120 (40)
35	34		Se	- 56 ^ 0 (40)
34	35		Br	—45 620 (c)
41	29	**70**	Cu	—63 390 (110)
40	30		Zn	—69 559,9 (34)
39	31		Ga	—68 905,2 (32)
38	32		Ge	—70 561,4 (18)
37	33		As	
36	34		Se	—61 590 (200)
35	35		Br	—51 140 (c)
41	30	**71**	Zn	—67 324 (10)
40	31		Ga	**—70 141,5 (26)**
39	32		Ge	**- 69 905,8 (21)**
38	33		As	- 67 893 (4)
37	34		Se	—63090 (c)
36	35		Br	- 56 490 (c)
35	36		Kr	—46 500 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
42	30	72	Zn	**—68 134 (6)**
41	31		Ga	**—68 591,0 (28)**
40	32		Ge	—72 582,6 (20)
39	33		As	**—68 232 (7)**
38	**34**		Se	**—67 894 (12)**
37	**35**		Br	—58 930 (с)
36	**36**		Kr	—53 870 (с)
43	30	73	Zn	—65 030 (200)
42	31		Ga	—69 730 (40)
41	32		Ge	—71 293,5 (19)
40	33		As	—70 949 (4)
39	34		Se	—68 209 (И)
38	35		Br	—63 670 (220)
37	36		Kr	—56980 (140)
44	30	74	Zn	—65 670 (140)
43	31		Ga	—68 020 (100)
42	32		Ge	—73 422,1 (19)
41	33		As	- 7 0 859,7 (25)
40	34		Se	- 7 2 212,7 (26)
39	35		Br	- 6 5 295 (15)
38	36		Kr	—62 020 (100)
45	30	75	Zn	—62 460 (с)
44	**31**		Ga	- 6 8 560 (200)
43	**32**		Ge	- 7 1 8 5 6 , 1 (24)
42	33		As	- 7 3 033,9 (23)
41	34		Se	**- 7 2 169,0 (24)**
40	35		Br	**- 6 9 159 (20)**
39	36		Kr	—64 160 (с)
38	37		Rb	- 5 7 510 (600)
46	30	76	Zn	—62 550 (170)
45	31		Ga	—66 440 (150)
44	32		Ge	—73 213,5 (25)
43	33		As	- 7 2 290,6 (23)
42	34		Se	**- 7 5 259,2 (25)**
41	35		Br	**—73 103 (15)**
40	36		Kr	**- 6 9 100 (200)**
39	37		Rb	—60 610 (270)
47	30	77	Zn	—58 910 (с)
46	**31**		Ga	—66 410 (с)
45	**32**		Ge	- 7 1 2 1 4 , 3 (26)
44	33		As	—73 915,7 (37)
43	34		Se	—74 606,1 (25)
42	35		Br	- 7 3 241,5 (38)
41	36		Kr	- 7 0 2 3 6 (30)
40	37		Rb	—65 ИО (120)
39	38		Sr	- 5 7 960 (280)
48	30	78	Zn	—58 080 (320)
47	31		Ga	-^6 3 680 (200)
46	32		Ge	—71 760 (70)
45	33		As	- 7 2 740 (70)
44	34		Se	—77 031,5 (26)
43	35		Br	- 7 3 458 (5)
42	36		Kr	—74 150 (8)
41	37		Rb	—67 090 (180)
40	38		Sr	—63 850 (с)
48	31	79	Ga	—62 810 (170)
47	32		Ge	- 6 9 570 (150)
46	33		As	—73 720 (50)
45	34		Se	—75920,6 (39)

Продолжение табл. 39. i

N	Z	A	Элемент	Дефект цассы, кэВ
44	35		Br	—76 070,0 (36)
43	36		Kr	—74 439 (9)
42	37		Rb	—70 860 (ИО)
41	38		Sr	- 6 5 460 (с)
49	31	80	Ga	- 5 9 530 (с)
48	32		Ge	- 6 9 430 (310)
47	33		As	- 7 2 060 (300)
46	34		Se	- 7 7 761,3 (35)
45	35		Br	- 7 5 891,0 (36)
44	36		Kr	- 7 7 897 (11)
43	37		Rb	- 7 2 190 (23)
42	38		Sr	—70 390 (с)
49	32	81	Ge	- 6 6 340 (с)
48	33		As	—72 640 (100)
47	34		Se	- 7 6 391,0 (37)
46	35		Br	—77 976 (6)
45	36		Kr	- 7 7 707 (18)
44	37		Rb	- 7 5 445 (35)
43	38		Sr	- 7 1 460 (50)
50	32	82	Ge	- 6 5 790 (с)
49	33		As	- 7 0 190 (с)
48	34		Se	—77 586 (10)
47	35		Br	- 7 7 498 (6)
46	36		Kr	—80 591 (6)
45	37		Rb	—76 213 (20)
44	38		Sr	- 7 5 999 (9)
43	39		V	- 6 7 910 (с)
50	33	83	As	- 6 9 950 (220)
49	34		Se	- 7 5 410 (32)
48	35		Br	- 7 9 0 2 5 (15)
47	36		Kr	- 7 9 984,6 (39)
46	37		Rb	- 7 8 987 (32)
45	38		Sr	- 7 6 737 (30)
44	39		V	—72 440 (с)
51	33	84	As	—66 160 (с)
50	34		Se	- 7 5 942 (18)
49	35		Br	**- 7 7 759 (26)**
48	36		Kr	**—82 431,9 (36)**
47	37		Rb	- 7 9 752 (4)
46	38		Sr	- 8 0 641 (4)
45	39		Y	- 7 3 692 (30)
44	40		Zr	- 7 1 440 (с)
51	**34**	85	Se	- 7 2 570 (с)
50	**35**		Br	- 7 8 670 (100)
49	36		Kr	**- 8 1 471,8 (37)**
48	37		Rb	**- 8 2 158,8 (33)**
47	38		Sr	—81 095 (7)
46	39		Y	—77 835 (12)
45	40		Zr	- 7 3 130 (с)
52	34	86	Se	- 7 0 860 (с)
51	35		Br	- 7 5 960 (400)
50	36		Kr	- 8 3 263 (5)
49	37		Rb	- 8 2 737,7 (32)
48	38		Sr	- 8 4 512,1 (28)
47			Y	- 7 9 239 (10)
46	40		Zr	—77 940 (с)
45	41		Nb	- 6 9 340 (с)
52	35	87	Br	- 7 4 210 (с)
51	36		Kr	—80 707 (5)
50	37		Rb	—84 595,7 (30)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
49	38		Sr	-84 868,9 (27)
48	39		Y	-83 007,2 (30)
47	40		Zr	-79 430 (80)
46	41		Nb	—74 430 (c)
53	35	88	Br	**-71 090 (c)**
52	36		Kr	**-79 686 (14)**
51	37		Rb	**—82 602 (12)**
50	38		Sr	**-87 910,6 (27)**
49	39		Y	**-84 298 (4)**
48	40		Zr	**-83 621 (10)**
47	41		Nb	-76 420 (c)
46	42		Mo	-72 920 (c)
53	36	89	Kr	-76 790 (60)
52	37		Rb	-81 717 (13)
51	38		Sr	-86 203 (4)
50	39		Y	-87 695,3 (30)
49	40		Zr	-84 859,5 (32)
48	41		Nb	—80 621 (19)
47	42		Mo	-75 220 (c)
54	36	90	Kr	-75 180 (70)
53	37		Rb	-79 570 (60)
52	38		Sr	-85 934,7 (38)
51			Y	-86 480,7 (33)
50	40		Zr	-88 764,6 (29)
49	41		Nb	-82 654 (5)
48	42		Mo	—80 167 (6)
47	43		Tc	-70 970 (c)
55	36	91	Kr	-71 770 (ПО)
54	37		Rb	-77 970 (40)
53	38		Sr	—83 666 (5)
52	39		Y	-86349,5 (35)
51	40		Zr	-87 892,5 (29)
50	41		Nb	-86 636,9 (38)
49	42		Mo	-82 199 (12)
48	43		Tc	-75 980 (200)
56	36	92	Kr	-69 150 (220)
55	37		Rb	-75 120 (200)
54	38		Sr	—82 892 (34)
53			Y	-84 822 (16)
52	40		Zr	—88 456,1 (28)
51	41		Nb	—86 448,1 (34)
50	42		Mo	-86 807 (4)
49	43		Tc	-78 936 (26)
57	36	93	Kr	—64 920 (c)
56	37		Rb	**—72 920 (170)**
55	38		Sr	**-80 280 (150)**
54	39		Y	**-84 227 (20)**
53	40		Zr	**-87 116,7 (28)**
52	41		Nb	**-87 209,0 (29)**
51	42		Mo	**—86 803 (4)**
50	43		Tc	**—83 610 (5)**
49	44		Ru	**-77 310 (c)**
57	37	94	Rb	со 4КП (cl
56	38		Sr	**—78 960 (70)**
55	39		Y	**-82 382 (12)**
54	40		Zr	**-87 263,9 (31)**
53	41		Nb	**—86 367,1 (30)**
52	42		Mo	**-88 412,3 (34)**
51	43		Tc	**-84 156 (6)**
50	44		Ru	**-82 571 (13)**

Продолжение табл. 39. i

N	z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
58	37	95	Rb	-66 550 (310)
57	38		Sr	-75 140 (90)
56	39		Y	-81 233 (20)
55	40		Zr	-85 663,4 (34)
54	41		Nr	-86 786,5 (25)
53	42		Mo	-87 712,1 *(24)*
52	43		Tc	—86 013 (8)
51	44		Ru	-83 452 (12)
50	45		Rh	-78 340 (150)
59	37	96	Rb	-62 770 (c)
58	38		Sr	—73 070 (140)
57	39		Y	-78 430 (100)
56	40		Zr	—85 444,7 (37)
55	41		Nb	-85 608 (5)
54	42		Mo	-88 794,9 (24)
53	43		Tc	-85 821 (6)
52	44		Ru	—86 075 (9)
51	45		Rh	—79 633 (13)
59	38	97	Sr	-69 080 (c)
58	39		Y	**-76 280 (130)**
57	40		Zr	**-82 954,2 (37)**
56	41		Nb	**-85 611,6 (31)**
55	42		Mo	**-85 544,5 (24)**
54	43		Tc	**—87 224 (5)**
53	44		Ru	**-86 070 (100)**
52	45		Rh	**-82 560 (100)**
51	46		P(l	**—77 760 (c)**
60	38	98	Sr	—67 380 (c)
59	39		Y	—73 190 (c)
58	40		Zr	**—81 291 (20)**
57	41		Nb	**—83 530 (6)**
56	42		Mo	**-88 115,4 (24)**
55	43		Tc	**-86 434 (6)**
54	44		Ru	-88 226 (6)
53	45		Rh	—83 168 (12)
52	46		Pd	—81 270 (c)
60		99	Y	-71 500 (220)
59	40		Zr	-77 890 (100)
58	41		Nb	-82 346 (16)
57	42		Mo	—85 969,5 (24)
56	43		Tc	-87 326,2 (25)
55	44		Ru	—87 619,8 (26)
54	45		Rh	—85 517 (10)
53	46		Pd	—82 1L2 (23)
52	47		Ag	-76 510 (c)
60	40	100	Zr	—76 600 (200)
59	41		Nb	-79 960 (130)
58	42		Mo	—86 189 (6)
57	43		Tc	—86 018,8 (27)
56	44		Ru	-89 221,6 (26)
55	45		Rh	—85 592 (20)
54	46		Pd	—85 230 (15)
53	47		Ag	-77 930 1400)
61	40	101	Zr	-73 050 (c)
60	41		Nb	-78 950 (100)
59	42		Mo	-83 516 (6)
58	43		Tc	-86 327 (24)
57	44		Ru	—87 951,6 (29)
56	45		Rh	-87 410 (18)
55	46		Pd	-85 428 (18)
54	47			-81 330 (c)
53	48			—75 530 (c)

Продолжение табл. 89.1

N	*Z*	*A*	Элемент	Дефект массы, кэВ
61	41	102	Nb	- 7 6 360 (С)
60	42		Mo	—83 562 (21)
59	43		Tc	- 8 4 600 (с)
58	44		Ru	- 8 9 100,5 (29)
57	45		Rh	- 8 6 777 (7)
56	46		Pd	—87 925 (9)
55	47		Ag	- 8 2 330 (50)
54	48		Cd	- 7 9 430 (с)
53	49		In	—70 130 (с)
62	41	103	Nb	- 7 5 410 (с)
61	42		Mo	—80 610 (с)
60	43		Tc	- 8 4 910 (100)
59	44		Ru	—87 261,4 (30)
58	45		Rh	—88 024 (4)
57	46		Pd	- 8 7 478 (9)
56	47		Ag	- 8 4 800 (50)
55	48		Cd	- 8 0 600 (140)
54	49		In	- 7 4 100 (с)
62	42	104	Mo	- 8 0 500 (с)
61	43		Tc	- 8 2 700 (с)
60	44		Ru	- 8 8 099 (6)
59	45		Rh	- 8 6 952 (4)
58	46		Pd	—89 400 (5)
57	47		Ag	- 8 5 150 (30)
56	48		Cd	—83 850 (с)
55	49		In	- 7 5 850 (с)
54	50		Sn	—71 150 (с)
€3	42	105	Mo	—77 140 (с)
62	43		Tc	—82 540 (200)
€1	44		Ru	- 8 5 938 (6)
60	45		Rh	—87 855 (6)
59	46		Pd	—88 422 (5)
58	47			- 8 7 075 (10)
57	48		c1	- 8 4 336 (Н)
56	49		In	- 7 9 340 (с)
55	50		Sn	—73 090 (с)
€3	43	106	Tc	- 8 0 030 (с)
€2	44		Ru	—86 333 (10)
61	45		Rh	- 8 6 372 (10)
60	46		Pd	- 8 9 913 (5)
59	47		As	- 8 6 929 (6)
58	48		Cd	- 87 131 (6)
57	49		In	- 8 0 586 (31)
56	50		Sn	- 7 6 990 (с)
55	51		Sb	- 6 6 190 (с)
64	43	107	Ts	- 7 9 510 (с)
63	44		Ru	- 8 3 710 (300)
62	45		Rh	—86 860 (40)
61	46		Pd	- 8 8 371 (6)
€0	47		Ag	- 8 8 404 (6)
59	48		Cd	- 8 6 987 (7)
58	49		In	- 8 3 500 (150)
57	50		Sn	- 7 8 400 (с)
56	51		Sb	- 7 0 400 (с)
64	44	108	Ru	- 8 3 820 (600)
63	45		Rh	- 8 5 020 (600)
	46		Pd	- 8 9 523 (5)
61	47			- 8 7 602 (6)
60	48		Й	- 8 9 251 (6)
59	49		In	- 8 4 100 (80)
58	50		Sn	- 8 1 900 (с)

Продолжение табл. 39.1

N	*Z*	Л	Элемент	Дефект мас(:ы, кэВ
57	51		Sb	- 7 2 400 I(С)
56	52		Te	- 6 5 320 I(с)
65	44	109	Ru	—80 810 i(с)
64	45		Rh	—85 110 i с
63	46		Pd	- 8 7 606 15)
62	47		Ag	- 8 8 722 (4)
61	48		Cd	- 8 8 540 ([5)
60	49		In	- 8 6 524 ((10)
	50		Sn	—82 620 ,(С)
58	51		Sb	- 7 6 1 2 0 (с)
57	52		Te	- 6 7 470 I(с)
65	45	110	Rh	—82 930 ((100)
64	46		Pd	- 8 8 335 (20)
63	47		Ag	- 8 7 456 I(4)
62	48		Cd	- 9 0 349 ([4)
61	49		In	- 8 6 409 (30)
60	50		Sn	- 8 5 834 1[16)
59	51		Sb	- 7 7 430 (с)
58	52		Te	- 7 1 760 (с)
66	45	111	Rh	—82 530 (с)
65	46		Pd	- 8 6 030 I
64	47		Ag	- 8 8 226 I
63	48		Cd	- 8 9 254 1 4
62	49		In	- 8 8 405 I(И)
61	50		Sn	- 8 5 941 I(8)
60	51		Sb	- 8 0 840 (С)
59	52		Te	- 7 3 4 7 0 1(70)
66	46	112	Pd	- 8 6 326 I(26)
65	47			—86 620 i(29)
64	48			- 9 0 577.I Э I34>
63	49		In	—88 000 (7)
62	50		Sn	- 8 8 658 (6)
61	51		Sb	- 8 1 740 (100)
60	52		Te	- 7 7 550 (с)
59	53		I	- 6 7 440 (с)
67	46	113	Pd	- 8 3 640 (с)
66	47			- 8 7 0 4 0 (20)
65	48		ё §	- 8 9 0 5 0 ,3 (35)
64	49		In	- 8 9 372 (5)
63	50		Sn	- 8 8 332 I(5)
62	51		Sb	- 8 4 443 (32)
61	52		Te	—78 540 (с)
60	53		I	—71 440 ((с)
67	47	114	Ag	- 8 5 160 (140)
66	48		Cd	- 9 0 019,(В (33)
65	49		In	—88 576 (5)
64	50		Sn	- 9 0 560 (4)
63	51		Sb	—84 870 (50)
62	52		Te	—82 190 ,(с)
61	53		I	- 7 3 070 ,(с)
60	54		Xe	- 6 7 090 I(с)
68	47	115		- 8 4 910 (
67	48			—88 093
66	49		In	- 8 6 541
65	50		Sn	—90 035,
64	51		Sb	—87 005 (•20)
63	52		Te	- 8 2 420 ('50^
62	53		I	—76 620 (с)
61	54		Xe	- 6 8 700 (с)

Продолжение табл. 39.1 *Продолжение табл. 39. i*

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
69	47	116	Ag	-8 2 620 (c)
68	48		Cd	—88 717,6 (37)
67	49		In	-8 8 253 (8)
66	50		Sn	**-91526,1 (36)**
65	51		Sb	**-8 6 930 (40)**
64	52		Te	-8 5 370 (IIO)
63	53		I	-7 7 610 (170)
62	54		Xe	-7 3 270 (260)
61	55		Cs	-6 2 630 (c)
70	47	117	Ag	-8 2 240 (100)
69	48		Cd	-8 6 416 (13)
68	49		In	-8 8 944 (9)
67	50		Sn	-9 0 398,9 (35)
66	51		Sb	-8 8 654 (18)
65	52		Te	-8 5 164 (35)
64	53		I	-8 0 850 (110)
63	54		Xe	—74 480 (c)
62	55		Cs	-6 6 850 (c)
70	**48**	118	Cd	-8 6 707 (20)
69	**49**		In	—87 450 (300)
68	**50**		Sn	-9 1 653,6 (35)
67	51		Sb	—87 967 (5)
66	52		Te	-8 7 671 (24)
65	53		I	-81 370 (c)
64	54		Xe	-7 8 070 (c)
63	55		Cs	—68 670 (c)
71	48	119	Cd	-8 4 230 (300)
70	49		In	-8 7 730 (18)
69	50		Sn	-9 0 066,7 (35)
68	51		Sb	—89 483 (12)
67	52		Te	—87 189 (13)
66	53		I	-8 3 820 (100)
65	54		Xe	-7 8 830 (160)
64	55		Cs	-7 2 530 (c)
63	56		Ba	—64 530 (c)
72	48	**120**	Cd	-8 3 981 (30)
71	49		In	-8 5 700 (100)
70	50		Sn	-9 1 101,8 (35)
	51		Sb	-8 8 421 (8)
68	52		Te	-8 9 404 (21)
67	53		I	—84 OOO (200)
66	54		Xe	-8 2 050 (280)
65	55		Cs	-7 3 640 (320)
64	56		Ba	-69050 (c)
72	49	**121**	In	**-8 5 842 (28)**
71	50		Sn	**-8 9 201,8 (35)**
70	51		Sb	-8 9 588,4 (35)
	52		Te	-8 8 508 (15)
68	53		I	-8 6 140 (40)
67	54		Xe	-8 2 350 (IIO)
66	55		Cs	-7 7 150 (c)
65	56		Ba	—70 570 (410)
73	49	**122**	In	-8 3 600 (150)
72	50		Sn	-8 9 946 (4)
71	51		Sb	-8 8 323,3 (36)
70	52		Te	-9 0 304 (4)
	53		I	-8 6 160 (40)
68	54		Xe	-8 5 160 (c)
67	55		Cs	-7 8 010 (c)
66	56		Ba	—74 260 (c)
74	49	123	In	-8 3 440 (40)
73	50		Sn	**—87 821 (4)**
72	51		Sb	**-8 9 217,5 (38)**
71	52		Te	-8 9 165,5 (38)
70	53		I	-8 7 970 (100)
69	54		Xe	-8 5 290 (100)
68	55		Cs	-8 0 890 (c)
67	56		Ba	-7 5 390 (c)
75	49	124	In	-8 1 100 (90)
74	50		Sn	-8 8 240 (5)
73	51		Sb	-8 7 613,4 (38)
72	52		Te	-90518,3 (38)
71	53		I	-8 7 361 (5)
70	54		Xe	-8 7 450 (140)
69	55		Cs	-8 1 530 (480)
68	56		Ba	**-7 8 750 (c)**
76	49	125	In	-8 0 500 (300)
75	50		Sn	-8 5 902 (5)
74	51		Sb	-8 8 252 (5)
73	**52**		Te	—89 019 (4)
72	**53**		I	
71	**54**		Xe	-8 7 110 (40)
70	**55**		Cs	—84 040 (40)
69	**56**		Ba	-7 9 460 (250)
77	49	126	In	-7 7 900 (120)
76	50		Sn	-8 6 024 (12)
75	51		Sb	-8 6 402 (32)
74	52		Te	—90 066 (4)
73	53		I	—87 911 (6)
72	54		Xe	—89 162 (8)
71	55		Cs	-8 4 330 (140)
70	56		Ba	—52 560 (c)
78	49	127	In	-7 7 170 (130)
77	50		Sn	-8 3 600 (100)
76	51		Sb	-8 6 704 (7)
75	52		Te	-8 8 285 (5)
74	53		I	-8 8 980 (5)
73	54		Xe	-8 8 316 (6)
72	55		Cs	-86206 (21)
71	56		Ba	—82 760 (100)
70	57		La	-7 7 760 (c)
79	49	128	In	—74 340 (250)
78	50		Sn	—83 440 (150)
77	51		Sb	-8 4 730 (150)
76	52		Te	-8 8 992,3 (39)
75	53		I	-8 7 734 (5)
74	54		Xe	-8 9 861,2 (16)
73	55		Cs	-8 5 935 (6)
72	56		Ba	-8 5 482 (20)
71	57		La	-7 8 680 (c)
80	49	129	In	—73 120 (180)
79	50		Sn	-8 0 640 (130)
78	51		Sb	-8 4 630 (22)
77	52		Te	-8 7 007 (4)
76	53		I	-8 8 505 (4)
75	54		Xe	-8 8 697,5 (20)
74	55		Cs	-8 7 563 (24)
73	56		Ba	-8 5 116 (19)
72	57		La	-81 120 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	z	A	Элемент	Дефект массы, кэБ
81	49	130	In	- 7 0 080 (c)
80	50		Sn	- 8 0 380 (130)
79	51		Sb	- 8 2 380 (80)
78	52		Te	- 8 7 348 (5)
77	53		1	- 8 6 897 (10)
76	54		Xe	- 8 9 881,1 (16)
75	55		Cs	- 8 6 863 (12)
74	56		Ba	- 8 7 303 (12)
73	57		La	- 8 1 600 (c)
81	50	131	Sn	- 7 7 480 (c)
80	51		Sb	—82 100 (c)
79	52		Te	- 8 5 201 (5)
78	53		1	- 8 7 451 (5)
77	54		Xe	- 8 8 421 (5)
76	55		Cs	- 8 8 066 (8)
75	56		Ba	- 8 6 726 (19)
74	57		La	- 8 3 770 (100)
73	58		Ce	- 7 9 470 (c)
82	50	132	Sn	—76 390 (220)
81	51		Sb	- 7 9 610 (200)
80	52		Te	-85 213 (21)
79	53		1	—85706 (21)
78	54		Xe	- 8 9 286 (5)
77	55		Cs	- 8 7 175 (23)
76	56			- 8 8 453 (10)
75	57		La	- 8 3 740 (50)
74	58		Ce	—82 340 (c)
82	51	133	Sb	—78 980 (210)
81	52		Te	- 8 2 930 (70)
80	53		1	—85 902 (31)
79	54		Xe	- 8 7 662 (9)
78	55		Cs	88 089 (8)
77	56		Ba	- 8 7 569 (9)
76	57		La	- 8 5 570 (c)
75	58		Ce	- 8 2 170 (c)
74	59		Pr	- 7 7 970 (c)
83	51	134	Sb	- 7 3 870 (c)
82	52		Te	- 8 2 670 (c)
81	53		1	- 8 3 970 (60)
80	54		Xe	- 8 8 125 (7)
79	55		Cs	- 8 6 909 (8)
78	56		Ba	- 8 8 968 (8)
77	57		La	- 8 5 268 (31)
76	58		Ce	- 8 4 770 (c)
75	59		Pr	- 7 8 470 (c)
83	52	135	Te	- 7 7 600 (250)
82	53		1	- 8 3 796 (29)
81	54		Xe	- 8 6 506 (И)
80	55		Cs	- 8 7 665 (9)
79	56			- 8 7 870 (7)
78	57		La	- 8 6 670 (12)
77	58		Ce	- 8 4 550 (100)
76	59		Pr	—80 990 (140)
75	60		Nd	—76 290 (c)
84	52	136	Te	- 7 4 830 (c)
83	53		1	—79 430 (100)
82	54		Xe	—86 425 (8)
81	55		Cs	—86 358 (8)
80	56		Ba	- 8 8 906 (7)
79	57		La	- 8 6 040 (70)
78	58		Ce	- 8 6 500 (40)
77	59		Pr	- 8 1 400 (60)
76	60		Nd	- 7 9 190 (70)

Продолжение табл. 39. i

	Элемент	Дефект массы, кэВ
	[	—76 720 (200)
	Xe	- 8 2 215 (22)
	Cs	- 8 6 560 (7)
	Ba	—87 733 (7)
	La	- 8 7 130 c)
	Ce	- 8 5 910 c)
	Pr	- 8 3 210 c)
	Nd	—79 410 (c)
	Pm	—74 210 (c)
	I	- 7 1 730 (c)
	Xe	- 8 0 030 (c)
	Cs	- 8 2 770 (c)
	Ba	- 8 8 273 (7)
	La	- 8 6 524 (7)
	Ce	- 8 7 565 (13)
	Pr	- 8 3 128 (16)
	Nd	- 8 2 030 (c)
	Pm	- 7 5 030 (c)
	Xe	—75 750 (90)
	Cs	- 8 0 630 (70)
	Ba	- 8 4 925 (7)
	La	- 8 7 231 (6)
	Ce	- 8 6 966 (8)
	Pr	—84 854 (13)
	Nd	- 8 2 050 (50)
	Pm	—77 500 (210)
	Sm	- 7 2 300 (450)
140	Xe	- 7 3 180 (260)
	Cs	- 7 7 240 (250)
	Ba	- 8 3 285 (12)
	La	- 8 4 320 (6)
	Ce	- 8 8 081 (6)
	Pr	- 8 4 693 (8)
	Nd	- 8 4 220 (40)
	Pm	- 7 8 180 (110)
	Sm	- 7 5 480 (c)
141	Xe	- 6 9 000 (140)
	Cs	—75 000 (100)
	Ba	- 7 9 980 (60)
	La	- 8 3 008 (31)
	Ce	- 8 5 438 (6)
	Pr	- 8 6 018 (6)
	Nd	- 8 4 203 (10)
	Pm	- 8 0 470 (40)
	Sm	- 7 5 910 (60)
	Eu	- 6 9 880 (100)
	Xe	- 6 6 050 (170)
	Cs	- 7 0 950 (130)
	Ba	- 7 7 820 (100)
	La	- 8 0 018 (9)
	Ce	- 8 4 535 (6)
	Pr	- 8 3 790 (6)
	Nd	—85 949 (5)
	Pm	- 8 1 060 (60)
	Sm	- 7 8 978 (16)
	Eu	- 7 1 480 (c)
	Cs	- 6 8 360 (c)
		—74 010 (c)
	La	- 7 8 310 (80)
	Ce	- 8 1 610 (6)
	Pr	- 8 3 065 (6)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
83	60		Nd	- 8 4 ООО (5)
82	61		Pm	- 8 2 959 (7)
81	62		Sm	- 7 9 5 1 1 (11)
80	63		Eu	—74 410 (50)
79	64		Gd	—68 510 (с)
89	55	144	Cs	- 6 3 930 (с)
88	56		Ba	- 7 2 030 (с)
87	57		La	- 7 4 930 (с)
86	58		Ce	- 8 0 431 (6)
85	59		Pr	- 8 0 750 (6)
84	60		Nd	- 8 3 746 (5)
83	61		Pm	- 8 1 416 (7)
62	62		Sm	—81 964 (6)
8t	63		Eu	- 7 5 636 (30)
80	64		Gd	—71 940 (с)
90	55	145	Cs	- 6 1 720 (с)
89	56		Ba	- 6 7 820 (С)
	57		La	—72 920 (с)
87	58		Ce	—77 120 (90)
£6	59		Pr	- 7 9 625 (11)
85	60		Nd	—81 430 (5)
84	61		Pm	- 8 1 270 (6)
83	62		Sm	- 8 0 656 (6)
82	63		Eu	- 7 7 936 (16)
81	64		Cd	—72 940 (с)
80	65		Tb	—66 240 (С)
90	56	146	Ba	- 6 5 560 (с)
89	57		La	- 6 9 460 (с)
	58		Ce	- 7 5 760 (120)
87	59		Pr	—76 840 (100)
86	60		Nd	- 8 0 923 (5)
85	61		Pm	- 7 9 442 (8)
84	62		Sm	- 8 0 984 (8)
83	63		Eu	- 7 7 111 (11)
82	64		Gd	- 7 5 910 (с)
81	65		Tb	- 6 7 810 (с)
90	57	147	La	- 6 7 540 (с)
89	58		Ce	- 7 2 240 (т)
	59		Pr	- 7 5 440 (200)
87	60		Nd	- 7 8 144 (5)
86	61		Pm	—79 040 (5)
85	62		Sm	- 7 9 265 (5)
84	63		Eu	- 7 7 535 (8)
83	64		Gd	- 7 5 207 (26)
22	65		Tb	—70 510 (с)
81	66		Dy	—64 210 (с)
90	58	148	Ce	- 7 0 710 (с)
89	59		Pr	- 7 2 510 (с)
	60		Nd	- 7 7 407 (5)
87	61		Pm	—76 870 (10)
86	62		Sm	- 7 9 335 (5)
85	63		Eu	—76 235 (22)
84	64		Gd	- 7 6 268 (6)
83	65		Tb	- 7 0 640 (80)
82	66		Dy	- 6 7 770 (с)
91	58	149	Ce	- 6 7 470 (с)
90	59		Pr	- 7 1 310 (200)
89	60		Nb	- 7 4 374 (5)
88	61		Pm	—76 063 (6)
87	62		Sm	—77 135 (5)
86	63		Eu	- 7 6 439 (7)

Продолжение табл. 39. i

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
85	64		Gd	- 7 5 131 (7)
84	65		Tb	—71 434 (16)
83	66		Dy	- 6 7 530 (с)
82	67		Ho	- 6 1 530 (с)
91	59	150	Pr	- 6 8 680 (с)
90	60		Nd	- 7 3 682 (6)
89	61		Pm	- 7 3 550 (80)
88	62		Sm	- 7 7 049 (5)
87	63		Eu	- 7 4 756 (11)
86	64		Gd	- 7 5 765 (II)
85	65		Tb	- 7 1 098 (11)
84	66		Dy	- 6 9 140 (с)
83	67		Ho	- 6 2 040 (с)
82	68		Er	- 5 7 940 (с)
92	59	151	Pr	- 6 7 440 (с)
91	60		Nd	- 7 0 945 (6)
90	61		Pm	- 7 3 386 (11)
89	62		Sm	—74 574 (5)
88	63		Eu	- 7 4 650 (5)
87	64		Gd	- 7 4 168 (9)
86	65		Tb	- 7 1 608 (8)
85	66		Dy	- 6 8 601 (27)
84	67		Ho	- 6 3 440 (с)
83	68		Er	- 5 8 200 (с)
82	69		Tm	- 5 0 8 0 0 (С)
92	60	152	Nd	- 7 0 146 (31)
91	61		Pm	- 7 1 290 (130)
90	62		Sm	- 7 4 761 (5)
89	63		Eu	- 7 2 884 (5)
88	64		Gd	- 7 4 703 (6)
87	65		Tb	- 7 0 853 (16)
86	66		Dy	—70116 (8)
85	67		Ho	- 6 3 710 (80)
84	68		Er	- 6 0 410 (с)
83	69		Tm	- 5 1 810 (с)
93	60	153	Nd	- 6 7 360 (с)
92	61		Pm	- 7 0 760 (100)
91	62		Sm	- 7 2 557 (5)
90	63		Eu	- 7 3 363 (6)
89	64		Gd	- 7 3 119 (6)
88	65		Tb	- 7 1 329 (9)
87	66		Dy	- 6 9 155 (8)
86	67		Ho	- 6 4 954 (34)
85	68		Er	- 6 0 3 1 0 (с)
84	69		Tm	—53 870 (с)
83	70		Yb	- 4 7 210 (с)
93	61	154	Pm	—68 450 (100)
92	62		Sm	- 7 2 454 (5)
91	63		Eu	—71 726 (7)
90	64		Gd	- 7 3 704 (5)
89	65		Tb	- 7 0 240 (50)
88	66		Dy	- 7 0 392 (12)
87	67		Ho	- 6 4 635 (с)
86	68		Er	- 6 2 440 (с)
85	69		Tm	- 5 4 530 (с)
84	70		Yb	—50050 (с)
94	61	155	Pm	- 6 7 100 (с)
93	62		Sm	- 7 0 196 (5)
92	63		Eu	—71 825 (6)
91	64		Gd	- 7 2 071 (5)
90	65		Tb	—71 256 (15)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	Л	Элемент	Дефект массы, кэВ
89	66		Dy	—69 157 (13)
88	67		Ho	- 6 6 055 (2 4)
87	68		Er	—62 057 (2 7)
86	69		Tт	- 5 6 450 (c)
85	70		Yb	- 5 0 450 (c)
84	*n*		Lu	- 4 2 600 (г)
94	62	156	Sm	- 6 9 368 (14)
93	63		Eu	- 7 0 083 (11)
92	64		Gd	- 7 2 536 (5)
91	65		Tb	- 7 0 098 (7
90	66		Dy	- 7 0 527 (9; 1
89	67		Ho	- 6 5 410 (c' >
88	68		Er	- 6 3 930 (cj 1
87	69		Tm	—56 940 (8
86	70		Yb	- 5 3 060 (c; 1
85	71		Lu	- 4 3 810 (c'1
95	62	157	Sm	- 6 6 860 (200
94	63		Eu	- 6 9 465 (16)
93	64		Gd	- 7 0 825 (5' 1
92	66		Tb	- 7 0 767 (6; 1
91	66		Dy	—69 425 (9;1
90	67		Ho	- 6 6 8 9 0 f5(D)
89	68		Er	—63 090 (c)
88	69		Tm	- 5 8 490 (c)
87	70		Yb	- 5 3 270 (c)
86	71		Lu	—46 470 (c;1
85	72		Hf	- 3 8 960 (c;)
95	63	158	Eu	- 6 7 240 (80)
94	64		Gd	- 7 0 691 (5)
93	65		Tb	—69 475 (6)
92	66		Dy	- 7 0 410 (6)
91	67		Ho	- 6 6 433 (8| 1
90	68		Er	- 6 5 030 (c; 1
89	69		Tm	- 5 8 430 (c|1
88	70		Yb	- 5 5 530 (c;1
87	71		Lu	- 4 7 230 (c;
86	72		Hf	- 4 2 220 (c)
96	63	159	Eu	- 6 5 930 (50)
95	64		Gd	- 6 8 562 (6)
94	65		Tb	- 6 9 536 (6;1
93	66		Dy	- 6 9 171 (6)
92	67		Ho	- 6 7 318 (11)
91	68		Er	—64 390 (100)
90	60		Tm	- 6 0 190 (c)
89	70		Yb	—55 290 (c)
88	71		Lu	- 4 9 490 (c)
87	72		Hf	- 4 2 800 (c)
97	63	160	Eu	- 6 3 540 (c)1
96	64		Gd	- 6 7 943 (5; 1
95	65		Tb	- 6 7 840 (61
94	66		Dy	- 6 9 7 7 4 (6)
93	67		Ho	- 6 6 388 (16)
92	68		Er	- 6 6 052 (2! Э)
91	69		Tm	—60 130 (6(Э)
90	70		Yb	- 5 7 550 (c|
89	71		Lu	—49 930 (c
88	72		Hf	- 4 5 750 (c
87	73		Ta	- 3 5 780 (c
97	64	161	Gd	- 6 5 507 (6)
96	65		Tb	—67 466 (6)
95	66		Dy	- 6 8 056 (6)

Продолжение табл. 39. i

N	–	*A*	Элемент	Дефект массы, КэВ
94	67		Ho	- 6 7 203 (6)
93	68		Er	- 6 5 197 (12)
92	69		Tm	- 6 1 680 (c)
91	70		Yb	- 5 7 400 (c)
90	71		Lu	—52 080 (c)
89	72		Hf	—46 130 (c)
88	73		Ta	- 3 8 840 (c)
98	64	162	Cd	—64 360 (120)
97	65		Tb	- 6 5 760 (70)
96	66		Dy	- 6 8 181 (6)
95	67		Ho	- 6 6 047 (7)
94	68		Er	- 6 6 335 (6)
93			Tm	- 6 1 540 (60)
92	70		Yb	- 5 9 340 (c)
91	71		Lu	—52 340 (c)
90	72		Hf	- 4 8 760 (c)
89	73		Ta	- 3 9 710 (c)
88	74		W	—34 130 (c)
98	65	163	Tb	—64 680 (50)
97	66		Dy	- 6 6 382 (6)
96	67		Ho	- 6 6 379 (6)
95	68		Er	- 6 5 168 (7)
94	69		Tm	- 6 2 770 (c)
93	70		Yb	—59 170 (c)
92	71		Lu	- 5 4 370 (c)
91	72		Hf	- 4 8 770 (c)
90	73		Ta	—42 370 (c)
89	74		W	- 3 4 850 (c)
99	65	**164**	Tb	—62110 (150)
98	66		Dy	—65967 (6)
97	67		Ho	- 6 4 937 (6)
96	68		Er	- 6 5 940 (6)
95			Tm	- 6 1 976 (21)
94	70		Yb	—60 880 (c)
93	71		Lu	- 5 4 580 (c)
92	72		Hf	—51 280 (c)
91	73		Ta	- 4 3 080 (c)
90	*74*		W	- 3 8 040 (c)
99	66	165	Dy	—63 611 (6)
98	67		Ho	—64 896 (6)
97	68		Er	- 6 4 518 (6)
96	69		Tm	- 6 2 924 (6)
95	70		Yb	- 6 0 161 (21)
94	71		Lu	- 5 6 160 (c)
93	72		Hf	- 5 1 260 (c)
92	73		Ta	- 4 5 360 (c)
91	74		W	- 3 8 670 (c)
100	66	**166**	Dy	- 6 2 583 (8)
99	67		Ho	- 6 3 067 (6)
98	68		Er	- 6 4 921 (6)
97	69		Tm	- 6 1 874 (13)
96	70		Yb	- 6 1 582 (9)
95	71		Lu	- 5 6 100 (160)
94	72		Hf	- 5 3 480 (c)
93	73		Ta	
92	74		W	- 4 1 480 (c)
100	67	167	Ho	—62 316 (21)
99	68		Er	- 6 3 286 (6)
98	69		Tm	- 6 2 537 (6)
97	70		Yb	- 6 0 583 (7)
96	71		Lu	- 5 7 450 (70)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	Л	Элемент	Дефект массы, кэВ
95	72		Hf	- 5 3 150 (с)
94	73		Ta	—47 950 (с)
93	74		W	—41 950 (с)
92	75		Re	- 3 4 650 (с)
101	67	168	Ho	- 6 0 270 (100)
100	68		Er	- 6 2 985 (6
99	69		Тт	- 6 1 306 (6
98	70		Yb	- 6 1 565 (7
97	71		Lu	- 5 7 100 (80)
96	72		Hf	- 5 5 100 (с)
95	73		Ta	—48 400 (с)
94	74		W	—44 500 (с)
93	75		Re	—35700 (с)
102	67	169	Ho	- 5 8 793 (21)
101	68		Er	- 6 0 9 1 7 (6; 1
100	69		Tm	- 6 1 269 (6;
99	70		Yb	- 6 0 361 (7; 1
98	71		Lu	- 5 7 881 (26)
97	72		Hf	- 5 4 530 (100)
96	73		Ta	- 5 0 030 (с)
95	74		W	- 4 4 890 (с)
94	75		Re	- 3 8 130 (cl
93	76		Os	- 3 0 550 (с)
103	67	170	Ho	- 5 6 100 (200)
102	68		Er	- 6 0 104 (6)
101	69		Tm	- 5 9 791 (6l (
100	70		Yb	- 6 0 759 (6)
99	71		Lu	—57 319 (21)
98	72		Hf	- 5 6 120 (с)
97	73		Ta	—50 120 (с)
96	74		W	- 4 6 920 (с)
95	75		Re	- 3 8 920 (с)
94	76		Os	- 3 3 530 (с)
103	68	171	Er	- 5 7 714 (6; 1
102			Tm	- 5 9 205 (6;
101	70		Yb	- 5 9 302 (6)
100	71		Lu	- 5 7 821 (6;)
99	72		Hf	- 5 5 300 (с)
98	73		Ta	- 5 1 600 (с)
97	74		W	- 4 6 900 (с)
96	75		Re	—41 100 (с)
95	76		Os	- 3 4 160 (с)
94	77		Ir	- 2 6 180 (с)
104	68	172	Er	- 5 6 491 (13)
103	69		Tm	- 5 7 380 (11)
102	70		Yb	—59 250 (6)
101	71		Lu	- 5 6 726 (6)
100	72		Hf	- 5 6 330 (с)
99	73		Ta	—51 410 (с)
98	74		W	—48 810 (с)
97	75		Re	- 4 1 510 (с)
96	76		Os	- 3 6 840 (с)
95	77		Ir	- 2 7 320 (cl
105	68	173	Er	- 5 3 730 (200)
104	69		Tm	- 5 6 226 (31)
103	70		Yb	- 5 7 546 (6)
102	71		Lu	- 5 6 871 (6)
101	72		Hf	- 5 5 270 (с)
100	73		Ta	- 5 2 370 (с)ı
99	74		W	—48 470 (с)
98	75		Re	- 4 3 370 (с)

Продолжение табл. 39. i

N	Z	Л	Элемент	Дефект массы изВ
97	76		Os	- 3 7 410 (с)
96	77		Ir	- 2 9 910 (с)
95	78		Pt	- 2 1 790 (с)
105	69	174	Tm	- 5 3 850 (50)
104	70		Yb	- 5 6 940 (6)
103	71		Lu	—55 562 (6)
102	72		Hf	—55 830 (8)
101	73		Ta	—51 980 (80)
100	74		W	- 5 0 080 (с)
99	75		Re	—43 580 (с)
98	76		Os	- 3 9 620 (с)
97	77		Ir	- 3 0 890 (с)
96	78		Pt	- 2 4 930 (с)
106	69	175	Tm	- 5 2 290 (50)
105	70		Yb	**—54 691 (6)**
104	71		Lu	**- 5 5 159 (5)**
103	72		Hf	- 5 4 548 (10)
102	73		Ta	- 5 2 350 (с)
101	74		W	- 4 9 450 (с)
100	75		Re	- 4 5 150 (с)
99	76		Os	- 3 9 710 (с)
98	77		Ir	- 3 3 160 (с)
97	78		Pt	- 2 5 640 (с)
96	79		Au	- 1 7 160 (с)
107	69	176	Tm	- 4 9 590 (с)
106	70		Yb	- 5 3 490 (6)
105	71		Lu	- 5 3 381 (5)
104	72		Hf	—54 567 (6)
103	73		Ta	- 5 1 470 (100)
102	74		W	—50 570 (с)
101	75		Re	—44 970 (с)
100	76		Os	—41 810 (с)
99	77		Ir	- 3 3 840 (с)
98	78		Pt	—28 540 (с)
97	79		Au	— 18 400 (с)
107	70	177	Yb	
106	71		Lu	—52 382 (5)
105	72		Hf	- 5 2 879 (6)
104	73		Ta	- 5 1 721 (7)
103	74		W	—49 720 (с)
102	75		Re	—46120 (с)
101	76		Os	—41 620 (с)
100	77		Ir	- 3 5 820 (с)
99	**78**		**Pt**	**- 2 9 350 (с)**
98	**79**		**Au**	**- 2 1 190 (с)**
97	**80**		**Hg**	**- 1 2 650 (с)**
108	70	178	Yb	—49 660 (50)
107	71		Lu	—50 300 (40)
106	72		Hf	—52 434 (6)
105	73		Ta	- 5 0 520 (100)
104	74		W	—50 430 (ООО)
103	75		Re	- 4 5 770 (210)
102	76		Os	- 4 3 350 (с)
101	77		Ir	—36 270 (с)
100	78		Pt	—31 630 (с)
99	**79**		Au	—22 410 (с)
98	**80**		Hg	- 1 5 930 (с)
108	71	179	Lu	- 4 9 110 (40)
107	72		Hf	
106	73		Ta	- 5 0 347 (8)
105	74		W	- 4 9 283 (17)
104	75		Re	—46 590 (50)

Продолжение табл. 39.1

N	z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
103	76		Os	-42 890 (c)
102	77		Ir	-37 890 (c)
101	78		Pt	—32 010 (c)
100	79		Au	—24 750 (c)
99	80		Hg	— 16 800 (c)
109	71	180	Lu	-46 680 (70)
108	72		Hf	-49 779 (6)
107	73		Ta	—48 914 (13)
106	74		W	-49 624 (8)
105	75		Re	-45 829 (31)
104	76		Os	-44 220 (c)
103	77		Ir	-37 930 (c)
102	78		Pt	-34 120 (c)
101	79		Au	-25 630 (c)
100	80		Hg	-19 860 (c)
109	72	181	Hf	-47 403 (6)
108	73		Ta	—48 425 (6)
107	74		W	-48 237 (9)
106	75		Re	—46 440 (c)
105	76		Os	-43 410 (c)
104	77		Ir	-39 340 (c)
103	78		Pt	-34 060 (c)
102	79		Au	-27 640 (c)
101	80		Hg	-20 790 (c)
110	72	182	Hf	-45 990 (50)
109	73		Ta	-46 417 (6)
108	74		W	-48 228 (6)
107	75		Re	-45 430 (c)
106	76		Os	—44 580 (c)
105	77		Ir	—38 980 (c)
104	78		Pt	—35 980 (c)
103	79		Au	—28 180 (c)
102	80		Hg	—23 210 (c)
111	72	183	Hf	-43 269 (32)
110	73		Ta	—45 279 (12)
109	74		W	-46 347 (6)
108	75		Re	-45 791 (10)
107	76		Os	-43 490 (c)
106	77		Ir	-40 090 (c)
105	78		Pt	-35 630 (c)
104	79		Au	-30 010 (c)
103	80		Hg	-23 690 (c)
102	81		Tl	-15 830 (c)
112	72	184	Hf	-41 480 (60)
111	73		Ta	-42 821 (27)
110	74		W	-45 687 (7)
109	75		Re	—44 191 (9)
108	76		Os	-44 233 (7)
107	77		Ir	—39 510 (250)
106	78		Pt	-37 210 (c)
105	79		Au	—30 220 (c)
104	80		Hg	—26 040 (c)
103	81		Tl	-16 900 (c)
112	73	185	Ta	—41 360 (21)
111	74		W	-43 370 (7)
110	75		Re	-43 802 (7)
109	76		Os	-42 787 (7)
108	77		Ir	-40 290 (c)
107	78		Pt	-36 490 (c)
106	79		Au	-31 730 (c)

Продолжение табл. 39. i

105		Hg	-26 140 (c)
104		T1	-19 110 (c)
103		Pb	-11 740 (c)
113	186	Ta	-38 600 (60)
112		W	-42 498 (7)
111		Re	-41 910 (7)
IIO		Os	-42 987 (7)
109		Ir	-39 156 (21)
108		Pt	-37 830 (c)
107		Au	-31 690 (c)
106		?f	-28 350 (c)
105			— 19 860 (c)
104		Pb	— 14 330 (c)
113		w	-39 893 (7)
112		Re	-41 205 (7)
111		Os	—41 208 (7)
110		Ir	—39 710 (c)
109		Pt	—36 810 (c)
108		Au	—32 870 (c)
107			-28 060 (c)
106			-21 930 (c)
105		Pb	-14 940 (c)
114		W	-38 657 (7)
113		Re	-39 006 (7)
112		Os	-41 125 (7)
111		Ir	-38 323 (13)
110		Pt	-37 788 (11)
109		Au	-32 490 (c)
108			-29 880 (c)
107		?f	-22 290 (c)
106		Pb	-17 500 (c)
115		w	-35 470 (200)
114		Re	-37 970 (11)
113		Os	-38 978 (7)
112		Ir	-38 480 (c)
111		Pt	-36 570 (c)
110		Au	-33 410 (c)
109		?P	-29 210 (c)
108		Pb	-24 020 (c)
107		Bi	-17 860 (c)
116		w	-9870 (c)
115		Re	—34 220 (360)
114		Os	—35 520 (200)
113		Ir	-38 699 (7)
112		Pt	-36 700 (200)
111		Au	-37 318 (21)
110		?f	-32 876 (26)
109		Pb	-30 960 (80)
108		Bi	-24 160 (310)
107			—20 220 (c)
116	191	Re	— 10 850 (c)
115		Os	-34 343 (12)
114		Ir	-36 388 (7)
113		Pt	-35 698 (16)
112		Au	-33 870 (50)
111			—30 480 (70)
110			—25 670 (210)
109		Pb	—20 230 (c)
108		Bi	— 13 050 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
116	76	192	Os	-35 875 (7)
115	77		Ir	-34 826 (7)
114	78		Pt	—36 283 (7)
113	79		Au	-32 768 (17)
112	80		Hg	—31 970 (с)
111	81		Tl	-25 590 (с)
110	82		Pb	-22 290 (с)
109	83		Bi	-13 670 (с)
117	76	193	OS	-33 387 (8)
116	77		Ir	-34 519 (6)
115	78		Pt	—34 458 (7)
114	79		Au	—33 360 (с)
113	80			-31 020 (с)
112	81			—27 020 (с)
111	82		Pb	—22 070 (с)
110	83		Bi	-15 560 (с)
109	84		Po	— 8 310 (с)
118	76	194	Os	-32 417 (7)
117	77		Ir	—32 514 (6)
116	78		Pt	—34 765 (6)
115	79		Au	-32 256 (16;
114	80		Hg	-32 206 (26)
113	81		Tl	—26 810 (с)
112	82		Pb	-23 810 (с)
111	83		Bi	-15 980 (с)
110	84		Po	— 10 810 (с)
119	76	195	Os	-29 690 (500)
118	77		Ir	—31 692 (31)
117	78		Pt	-32 802 (6)
116	79		Au	—32 572 (6)
115	80		Hg	—31 050 (50)
114	81		Tl	—27 850 (210)
113	82		Pb	—23 550 (с)
112	83		Bi	—17 680 (210)
111	84		Po	—11 060 (с)
119	77	196	Ir	-29 440 (60)
118	78		Pt	—32 652 (6)
117	79		Au	—31 162 (9)
116	80		Hg	—31 846 (10)
115	81		Tl	-27 350 (с)
114	82		Pb	—25 150 (с)
113	83		Bi	— 17 760 (с)
112	84		Po	—13 210 (с)
111	85		At	-4050 (с)
120	77	197	Ir	-28 430 (200)
119	78		Pt	-30 431 (6)
118	79		Au	—31 150 (6)
117	80		Hg	-30 735 (21)
116	81		Tl	—28 330 (с)
115	82		Pb	—24 630 (с)
114	83		Bi	-19 410 (с)
113	84		Po	—13 230 (с)
112	85		At	-6030 (с)
121	77	198	Ir	-25 520 (300)
120	78		Pt	—29 921 (20)
119	79		Au	—29 591 (6)
118	80		Hg	—30 964 (6)
117	81		Tl	—27 500 (80)
116	82		Pb	-25 900 (с)
115	83		Bi	-19 300 (с)
114	84		Po	— 15 070 (с)
113	85		At	-6670 (ЗЮ)

Продолжение табл. 39. i

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
121	78	199	Pt	-27 420 (25)
120	79		Au	—29 104 (6)
119	80			—29 557 (6)
118	81		?f	—28 080 (220)
117	82		Pb	-25 280 (90)
116	83		Bi	—20 610 (с)
115	84		Po	—15 050 (с)
114	85		At	-8470 (210)
122	78	200	Pt	-26 600 (с)
121	79		Au	-27 300 (50)
120	80		Hg	-29 514 (6)
119	81		Tl	—27 060 (10)
118	82		Pb	-26 160 (с)
117	83		Bi	-20460 (с)
116	84		Po	-16 740 (с)
115	85		At	-8670 (с)
114	86		Rn	—3740 (с)
123	78	201	Pt	-23 740 (110)
122	79		Au	-26 400 (100)
121	80		Hg	-27 672 (6)
120	81		Tl	-27 185 (16)
119	82		Pb	-25 327 (35)
118	83		Bi	-21 410 (с)
117	84		Po	-16410 (с)
116	85		At	—10 520 (с)
115	86		Rn	-3950 (с)
123	79	202	Au	—23 860 (200)
122	80			—27 356 (6)
121	81			-25 988 (18)
120	82		Pb	-25 942 (11)
119	83		Bi	-21 040 (с)
118	84		Po	-17 780 (с)
117	85		At	— 10 520 (С)
116	86		Rn	-5880 (с)
115	87		Fr	-3160 (310)
124	79	203	Au	-22 980 (с)
123	80			—25 277 (6)
122	81		?F	-25 769 (6)
121	82		Pb	-24 794 (10)
120	83		Bi	-21 600 (50)
119	84		Po	-17 360 (90)
118	85		At	- И 970 (с)
117	86		Rn	-6000 (с)
116	87		Fr	1230 (210)
125	79	204	Au	—20 200 (300)
124	80			-24 703 (6)
123	81		?f	—24 353 (6)
122	82		Pb	-25 117 (6)
121	83		Bi	-20 820 (с)
120	84		Po	-18 250 (с)
119	85		At	-11 970 (с)
118	86		Rn	—7770 (с)
117	87		Fr	870 (с)
116	88		Ra	6280 (с)
125	80	205	Hg	-22 299 (8)
124	81		Tl	-23 837 (5)
123	82		Pb	—23 777 (6)
122	83		Bi	—21 070 (9)
121	84		Po	-17 576 (35)
120	85		At	— 12 960 (с)

Продолжение табл. 39.1 *Продолжение табл. 39. i*

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ	N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
119	**86**		**Rn**	**-7600 (c)**	131	82	213	Pb	-3140 (c)
118	**87**		**Fr**	**— 1040 (c)**	130	83		Bi	-5243(11)
117	**88**		**Ra**	**5980 (c)**	129	84		Po	-6663 (7)
126	80	206	Hg	-20 955 (21)	128	85		At	-6589(13)
125	81		Tl	-22 269 (5)	127	86		Rn	-5706(11)
124	82		Pb	-23 795 (5)	126	87		Fr	-3556(11)
123	83		Bi	-20 033 (12)	125	88		Ra	290 (35)
122	84		Po	-18 190 (11)	124	89		Ac	**6170 (c)**
121	85		At	-12 730 (c)	123	90		Th	**12 240 (c)**
120	86		Rn	-8970 (c)	132	82	214	Pb	-185,3(33)
119	87		Fr	-1180 (c)	131	83		Bi	-1209(12)
118	88		Ra	3960 (c)	130	84		Po	-4479 (5)
126	81	207	Tl	—21041 (6)	129	85		At	-3389 (6)
125	82		Pb	—22 463 (5)	128	86		Rn	-4328(11)
124	83		Bi	-20 058 (8)	127	87		Fr	- 965(13)
123	84		Po	-17 150 (11)	126	88		Ra	90 (13)
122	85		At	-13 310 (50)	125	89		Ac	6140 (c)
121	86		Rn	-8690 (90)	124	90		Th	10 870 (c)
120	87		Fr	-2650 (c)	132	83	215	Bi	1710(100)
119	88		Ra	3700 (c)	131	84		Po	—540,5(37)
127	81	208	Tl	-16 768 (6)	130	85		At	-1262 (7)
126	82		Pb	—21 759 (5)	129	86		Rn	-1179 (10)
125	83		Bi	-18 879 (5)	128	87		Fr	309(13)
124	84		Po	-17 475 (6)	127	88		Ra	2531 (12)
123	85		At	-12 640 (c)	126	89		Ac	5950 (50)
122	86		Rn	-9560 (c)	125	90		Th	10 870 (90)
121			Fr	—2770 (c)	133	83	216	Bi	5970 (c)
120	88		Ra	1930 (c)	132	84		Po	1769 (6)
128	81	209	Tl	-13 650 (15)	131	85		At	2237 (6)
127	82		Pb	-17 624 (5)	130	86		Rn	245(11)
126	83		Bi	-18 268 (5)	129	87		Fr	2975(14)
125	84		Po	— 16 373 (7)	128	88		Ra	3285(11)
124	85		At	-12 888 (9)	127	89		Ac	7980 (c)
123	86		Rn	-8994 (35)	126	90		Th	10 390 (c)
122	**87**		**Fr**	**-3760 (c)**	133	84	217	Po	5960 (c)
121			**Ra**	**1970 (c)**	132	85		At	4382(12)
120	**89**		**Ac**	**9120 (c)**	131	86		Rn	3649 (8)
129	81	**210**	Tl	-9251 (13)	130	87		Fr	4307(15)
128	82		Pb	-14 738 (5)	**129**	88		Ra	5881 (13)
127	83		Bi	-14 801 (5)	**128**	89		Ac	8701 (15)
126	84		Po	— 15 963 (5)	127	90		Th	12 141 (36)
125	85		At	-11 976 (12)	134	84	218	Po	8354,6(33)
124	86		**Rn**	**—9608 (12)**	133	85		At	8099 (13)
123			**Fr**	**-3640 (c)**	132	86		Rn	5212(5)
122	**88**		**Ra**	**610 (c)**	131	87		Fr	7050 (6)
121	**89**		**Ac**	**8860 (c)**	130	88		Ra	6644 (14)
129	82	**211**	Pb	**— 10 491,9 (38)**	129			Ac	10 837 (16)
128	83		Bi	**— 11 865 (6)**	128	**90**		Th	12 362 (16)
127	84		**Po**	**-12 444 (5)**	134	85	219	At	10 530 (80)
126	**85**		**At**	— 11653 (9)	133	86		Rn	8830.7(37)
125	**86**		**Rn**	**-8761 (11)**	132	87		Fr	8617 (9)
124	**87**		Fr	—4220 (50)	131	88		Ra	9377 (14)
123	88		Ra	780 (90)	130	89		Ac	11 560 (16)
122	89		Ac	7400 (c)	129	90		Til	14 470 (24)
130	**82**	212	Pb	-7562 (6)	135	85	220	At	14 200 (c)
129	**83**		Bi	-8135 (6)	134	86		Rn	**10 599 (6)**
128	84		Po	-10 381 (5)	133	87		Fr	**11 470 (8)**
127	85		At	-8625 (6)	132	88		Ra	**10 263 (15)**
126	86		Rn	-8666 (7)	131			Ac	**13 747 *(17)***
125	87		Fr	-3690 (c)	130	90		Th	14 663 (23)
124	88		Ra	- IIO (c)					
123	89		Ac	7180 (c)					

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
135	86	221	Rn	14 380 (с)
134	87		Fr	13 265 (12)
133	88		Ra	12 957 (9)
132	89		Ac	14 518 (18)
131	90		Th	16 934 (14)
136	86	222	Rn	16 370,0 (33)
135	87		Fr	16 338 (21)
134	88		Ra	14 312 (6)
133	89		Ac	16 617 (7)
132	90		Th	17 197 (16)
131	91		Pa	21 959 (35)
136	87	223	Fr	18 382,3 (37)
135	88		Ra	17 234,8 (37)
134	89		Ac	17 825 (9)
133	90		Th	19 256 (17)
132	91		Pa	22 330 (19)
137	87	224	Fr	21 710 (с)
136	88		Ra	18 813 (6)
135	89		Ac	20 219 (8)
134	90		Th	19 993 (18)
133	91		Pa	23 798 (20)
138	87	225	Fr	23 790 (с)
137	88		Ra	21 987,3 (36)
136	89		Ac	21 626 (12)
135	90		Th	22 303 (11)
134	91		Ra	24 320 (21)
139	87	226	Fr	27 460 (330)
138	88		Ra	28 665,7 (33)
137	89		Ac	24 301,0 (38)
136	90		Th	23 189 (6)
135	91		Pa	26 029 (12)
134	92		и	27 186 (34)
140	87	227	Fr	29 580 (100)
139	88		Ra	27 185 (20)
138	89		Ac	25 850,0 (31)
137	90		Th	25 806,3 (37)
136	91		Pa	26 832 (10)
135	92		и	28 880 (с)
140	88	228	Ra	28 941 (5)
139			Ac	^о ВУЬ
138	90		Th	26 758 (6)
137	91		Pa	28 870 (9)
136	92		и	29 221 (21)
141	88	229	Ra	32 720 (с)
140	89		Ac	30 720 (150)
139	90		Th	29 580,9 (34)
138	91		Pa	29 887 (13)
137	92		и	31201 (11)
136	93		Np	33 758 (29)
142		230	Ra	34 560 (с)
141	89		Ac	33 760 (с)
140	90		Th	30 861.3 (29)
139	91		Pa	32 165,5 (37)
138	92		и	31 607 (6)
137	93		Np	35 232 (24)
142	89	231	Ac	35 910 (100)
141	90		Th	33 812,2 (30)
140	91		Pa	33 423,1 (31)
139	92		и	33 780 (50)
138	93		Np	35 626 (13)

Продолжение табл. 39. i

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
143	89	232	Ac	39 150 (с)
142	90		Th	35 447,2 (23)
141	91		Pa	35 934 (12)
140	92		и	34 597 (6)
139	93		Np	37 290 (с)
138	94		Pu	38 362 (23)
143	90	233	Th	38 732,3 (24)
142	91		Pa	37 487,1 (24)
141	92		и	36 914,7 (33)
140	93		Np	38 010 (с)
139	94		Pi	40 042 (23)
144	90	234	Th	40 612 (4)
143	91		Pa	40 349 (5)
142	92		и	38 142,6 (24)
141	93		Np	39 951 (9)
140	94		Pu	40 342 (8)
139	95		Am	44 460 (с)
145	90	235	Th	44 150 (с)
144	91		Pa	42 320 (100)
143	92		и	40 916,4 (24)
142	93		Np	41 039,5 (26)
141	94		Pu	42 160 (6)
140	95		Am	44 650 (с)
145	91	236	Pa	45 540 (200)
144	92		и	42 442,0 (23)
143	93		Np	43 426 (10)
142	94		Pu	42 889 (6)
141	95		Au	46 020 (с)
140	96		Cm	47 890 (с)
146	91	237	Pa	47 640 (50)
145	92		и	45 388,7 (25)
144	93		Np	44 869,3 (23)
143	94		Pu	45 087 (6)
142	95		Am	46 640 (с)
141	96		Cm	49 170 (с)
147	91	238	Pa	51 270 (300)
146	92		и	48 307.0 (22)
145	93		Np	47 452,6 (23)
144	94		Pu	46 160,8 (24)
143	95		Am	48 417 (32)
142	96		Cm	49 398 (31)
141	97		Bk	54 280 (с)
147	92	239	и	50 572,2 (22)
146	93		Np	49 306,4 (30)
145	94		Pu	48 585,1 (24)
144	95		Am	49 389 (5)
143	96		Cm	51 090 (с)
142	97		Bk	54 280 (с)
148	92	240	и	52 712 (5)
147	93		Np	52 210 (60)
146	94		Pu	50 122,8 (23)
145	95		Am	51 443 (20)
144	96		Cm	51 712 (6)
143	97		Bk	55 710 (с)
142	98		Cf	58 030 (с)
148	93	241	Np	54 310 (100)
147	94		Pi	52 953,0 (23)
146	95		Am	52 932.2 (23)
145	96		Cm	53 606 (6)
144	97		Bk	56 100 (с)
,143	98		Cf	59 190 (с).

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
149	93	242	Np	57 250 (с)
148	94		Pu	54 715,0 (23)
147	95		Am	55 462,7 (27)
146	96		Cm	54 801,5 (24)
145	97		Вк	57 800 (с)
144	98		Cf	59 332 (33)
149	94	243	Pu	57 752,5 (35)
148	95		Am	57 170,1 (32)
147	96		Cm	57 177,4 (26)
146	97		Bk	58 685 (6)
145	98		Cf	60 910 (с)
144	99		Es	64 800 (с)
150	94	244	Pu	59 803 (5)
149	95		Am	59 878,6 (31)
148	96		Cm	58 449,6 (23)
147	97		Bk	60 646 (21)
146	98		Cf	61 465 (6)
145	99		Es	65 970 (с)
151	94	245	Pu	63 157 (30)
150	95		Am	61 897,3 (36)
149	96		Cm	61 001,3 (29)
148	97		Bk	61811 (5)
147	98		Cf	63 377 (6)
146	99		Es	66380 (с)
145	100		Fm	70 020 (с)
152	94	246	Pu	65 290 (50)
151	95		Am	64 920 (50)
150	96		Cm	62 616,0 (34)
149	97		Bk	64 020 (с)
148	98		Cf	64 096,2 (31)
147	99		Es	67 930 (с)
146	100		Fm	70131 (36)
152	95	247	Am	67 130 (с)
151	96		Cm	65 530 (5)
150	97		Bk	65 484 (6)
149	98		Cf	66 150 (с)
148	99		Es	68 550 (31)
147	100		Fm	71 540 (с)
153	95	248	Am	**70490 (с)**
152	96		Cm	**67 389 (6)**
•151	97		Bk	67 990 (с)
150	98		Cf	67 243 (31)
149	99		Es	70 220 (с)
148	100		Fm	71 891 (21)
147	101		Md	77 000 (с)
153	96	249	Cm	70 748 (8)
152	97		Bk	69 848,0 (35)
151	98		Cf	69 721,6 (30)
150	99		Es	71 116 (7)
149	100		Fm	73 500 (с)
148	101		Md	77 260 (с)
154	96	250	Cm	72 986 (12)
153	97		Bk	72 950 (5)
152	98		Cf	71 169,8 (35)
151	99		Es	73 170 (с)
150	100		Fm	74 069 (31)
149	101		Md	78 600 (с)
154	97	251	Bk	75 250 (с)
153	98		Cf	74 130 (S)
152	99		Es	74 503 (8)

Продолжение табл. 39. i

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
151	100		Fm	76000 (с)
150	101		Md	79 030 (с)
155	97	252	Bk	78 530 (с)
154	98		Cf	76 031 (6)
153	99		Es	77 150 (с)
152	100		Fm	76 822 (33)
151	101		Md	80 500 (с)
150	102		No	82 862 (26)
155	98	253	Cf	79 299 (10)
154	99		Es	79 012,4 (35)
153	100		Fm	79 346 (5)
152	101		Md	81 240 (с)
151	102		No	84 330 (с)
156	98	254	Cf	81 342 (12)
155	99		Es	81 992 (6)
154	100		Fm	80 899 (5)
153	101		Md	83 390 (с)
152	102		No	84 729 (34)
156	99	255	Es	84 080 (с)
155	100		Fm	83 796 (5)
154	101		Md	84 880 (с)
153	102		No	86 870 (с)
152	103		Lr	90 250 (с)
157	99	256	Es	87 260 (с)
156	100		Fm	85 481 (8)
155	101		Md	87420 (с)
154	102		No	87 801 (40)
153	103		Lr	91 820 (с)
157	100	257	Fm	88 588 (10)
156	101		Md	89 040 (с)
155	102		No	90 223 (31)
154	103		Lr	92 970 (с)
153	104		–	95 950 (с)
157	101	258	Md	91 820 (с)
156	102		No	91 520 (с)
155	103		Lr	94 820 (с)
154	104			96 550 (с)
157	102	259	No	94 026 (11)
156	103		Lr	96 000 (с)
155	104		–	98 500 (с)
157	103	260	Lr	98 140 (с)
156	104		–	99 230 (с)
155	105		–	103 650 (с)
157	104	261	—	101 250 (с)
156	105		–	104 460 (с)
157	105	262	–	106 040 (с)
157	106	263	—	110 310 (с)

39.4. ПОРОГ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Если энергия реакции Q<0, то реакция идет с поглощением энергии, и для того чтобы она началась, падающая частица должна обладать энергией, превышающей порог реакции:

$$£nop = |Q| \quad +$$

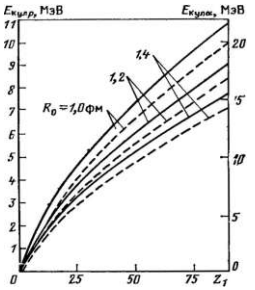
где Ail и Mj — массы частиц во входном канале реакции.

39.5. КУЛОНОВСКИЙ БАРЬЕР

Заряженные частицы, вступая в реакцию, должны преодолеть электростатическое отталкивание их зарядов — так называемый кулоновский барьер.

Высота кулоновского барьера ядра с зарядом Zjg и радиусом Ri для частицы с зарядом Zje и радиусом R2 дается выражением

где Ro — постоянная, принимаемая обычно равной около 1 фм (1 фм=10-15 м); i4, и A2 — массовые числа взаимодействуюших ядер.



ЭЛ. Высота кулоновского барьера для протонов (сплошные кривые) и а-частиц (пунктир)

На рис. 39.1 приведен график зависимости высоты кулоновского барьера от Z„, вычисленной на основе приведенных выше формул для наиболее распространенного изотопа данного элемента [2].

39.6. КИНЕМАТИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИИ

Под кинематикой ядерной реакции понимают соотношения между энергиями частиц, участвующих в реакции, а также соотношения между углами и сечениями в л е к и СЦМ (рис. 39.2).

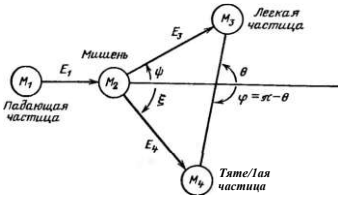


Рис. 39.2. Кинематическая схема ядерной реакции: Л„ и —массы и энергии участвующих частиц: и 6 — Углы разлета частиц в ЛСК: 6 н ф - в СМЦ

Ниже приведены наиболее важные кинематические уравнения для нерелятивистских и релятивистских энергий. Для частиц с нерелятивистской энергией справедливы уравнения

MJM3

oos^^ 1) -

\+ Л14

M4

Ум, Ms £3

Mi **cos ф.**

Введем следующие обозначения: т) и | — углы вылета частиц в ЛСК; 6 и ф — углы вылета в СЦМ; £•,— энергии частиц в ЛСК; — энергия в СЦМ:

Q = (M, -Ь Ма — Mg — M^) энергия реакции;

\+ *Q* = +

. ^ ^ A .

MjMs ^

C = *(M,*

M2M4

(MI -Ь Ma) *(Ms* + M4) I, ^ Ms У

AtB+C + *D=V.* *AC=^BD.*

Приведем расчетные формулы для кинематики ядерных нерелятивистском случае;

Энергия легкой частицы *Eg/Ej.* = *B+D* *(AC^^^* **X**

X cose =B|c05ф ±

(если Be D, используется только знак плюс; если B > D, используются оба знака — в этом случае существует предельный угол вылета)

Энергия тяжелой частицы в ЛСК *EJEt* = *A* + *C* +

-f 2(ЛС)'''2С08Y - Л[С05? ±

a: (C/Л — sin2£)i/2|2

(если < C, используется только знак плюс; если Л > C, используются оба знака — в этом случае существует предельный угол вылета)

Угол вылета тяжелой частицы в ЛСК

Угол вылета легкой частицы СЦМ **sine =** £3 **TTd** ,

Соотношения сечений и углов вылета в ЛСК и СЦМ для легкой частицы

$$\frac{c\,(\theta)}{a\phi)} \sim \frac{\sin Ш}{\sin Bde}$$

$$A = 2\,MJi + \quad + 2Л1,/И3 + 20\ (M^ + M^-M^i-Q^;$$

$$B = E\% — P\backslash \cos^{\wedge};;\ dBId'^ = 2P\int \sin + \cos \phi:$$

$$= (1/2B)\ /Ej.\ Л \pm P1\ COS\ Ф\ "I \qquad 2M1\ B\ ] - Л^3^$$

Соотношения сечений и углов вылета в ЛСК и СЦМ для тяжелой частицы

$$\frac{\sin Sd?}{a(£)} \quad \frac{\sin<fd<f}{\dfrac{\sin^S}{\sin^{-f}}\ \cos(<f — S)}$$

$$Q = ML + ЖТ — MG — \quad + \quad —$$

$$-2E3\ (£1 + MA) + 2\ PJ\ P3\ COS\ >L| \quad ;$$

$$£ = SIN\text{-}MCPS/Z'A)\ SIN4'];$$

$$EJEr$$

$$S'l' \quad 2B \quad у \quad \cdot \sin \phi;$$

Соотношения сечений и углов вылета для частиц — продуктов реакции в ЛСК

$$\frac{\sin£d?}{\dfrac{\sin^-l>\cos(6—\phi)}{\sin^ £\cos(\varphi — S)}}$$

$$£n0P = IQI\ Шу + Л1.)/M, + IQ1/2M,|.$$

Для частиц с релятивистской энергией к введенным выше обозначениям добавляются: М — масса покоя, МэВ (т. е. скорость света с=1); *Т* — кинетическая энергия; *E=T+M* — полная энергия; Р = У *Е^* — = — релятивистский импульс;

$$E^ \quad ^r^ + Mi + M^;$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wapstra A. N.. Bos K.//**Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1977. Vol. 19. P. 177—216.**

2. Marion J. B., Young **F.** C. **Nuclear Reaction Analysis: Graphs and Tables. Amsterdam: North-Holland PubL Сотр. 1968.**

Глава 40
ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

А. И. Обухов, И. С. Григорьев

40.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Целение атомного ядра **— это процесс распада на два (реже три и четыре) сравнимых по массе ядра — осколка деления. Впервые деление ядер наблюдалось при облучении ядер урана нейтронами [1], затем было обнаружено спонтанное деление ядер урана [2]. Для ядер с массовым числом Л>100 реакция деления экзотермична, поскольку энергия связи, приходящаяся на один нуклон, в ядрах-осколках больше, чем в делящемся ядре. Освобождаемая при делении ядер энергия выделяется в виде кинетической энергии осколков, энергии, которая уносится нейтронами, Y-квантами, р-частицами и антинейтрино, сопровождающими процесс деления ядер.**

Энергию возбуждения можно сообщить ядру облучением его Y-квантами или бомбардировкой его нейтронами и заряженными частицами высоких энергий, которые при неупругих соударениях передают ядру часть своей энергии Особо важное значение имеет процесс деления ядер при захвате нейтронов.

Порог деления, вызванного ^-квантами, т. е. энергии наиболее низкоэнергетических ν-квантов, еще способных вызвать деление, является непосредственной мерой минимальной энергии возбуждения ядра, необходимой для деления. Порог реакции деления под действием нейтронов меньше порога фотоделения составного ядра на энергию связи нейтрона с ядром мишени, вследствие чего некоторые из порогов реакции деления ядер под действием нейтронов отрицательны. Это означает, что процесс деления возможен при захвате ядрами тепловых и холодных нейтронов. Такие ядра называются хорошо делящимися ^ззи, гэрц^ 24! рц)

Кроме деления ядер под действием указанных механизмов возбуждения возможен процесс деления ядер без каких-либо видимых внешних воздействий на ядро. Такой процесс называют спонтанным делением ядер. Принято считать, что в невозбужденных ядрах (представляемых как маленькие капли) имеют место колебания с периодом 10-2"—10-2' ^ амплитудой 0,1—0,2 радиуса ядра. Наличие барьера деления сдерживает самопроизвольный развал ядра, однако после огромного числа колебаний барьер может оказаться случайно пройденным посредством туннельного перехода. Времена жизни ядер по отношению к спонтанному делению изменяются от Ю^' лет для изотопов урана и тория до миллисекунд для ядер с зарядом 2=104-^107.

Образующиеся при делении тяжелого ядра осколки в большинстве случаев имеют разные массы: например, при делении ядер урана масса легкого осколка составляет 90—100 а.е.м., а масса тяжелого — 130—140 а.е.м.

Скорости осколков — порядка 10^ см/с. Импульсы равны и противоположны по знаку. Скорость осколков достигает 0,9 конечного значения за время около 10-^° с при расстоянии между ними порядка 10-" см, когда они еще находятся внутри наинизшей электронной оболочки атома.

Осколки деления первоначально находятся в возбужденных состояниях. Их суммарная энергия возбуждения примерно равна 20 МэВ. В первую очередь осколки за 10"'^—10-'^ с сбрасывают лишние нейтроны (мгновенные нейтроны деления). Средняя энергия возбуждения осколка после испускания нейтронов равна половине энергии связи нейтрона и составляет для обоих осколков 6—7 МэВ. Эта энергия излучается в виде у квантов за 10"®—10"" с.

В начале своего пути осколки имеют положительный заряд от 10 до 20 электронных зарядов, так как некоторые из орбитальных электронов «стряхиваются» при делении. Проходя через вещество, осколки теряют свою энергию в основном на ионизацию среды. Вдоль пути двух осколков образуется примерно 5-10® пар ионов. Время замедления осколков в воздухе порядка 10-® с, а в плотных средах—10-'^ с. За это время они пробегают в воздухе расстояние около 2 см, а в плотных средах—10-^ см.

Заряд замедлившихся осколков сильно отличается от заряда стабильных нуклидов той же массы. Это различие уменьшается в серии р-распадов (обычно трех или четырех для каждого осколка).

В отдельных случаях р-распад продуктов деления приводит к высоковозбужденным состояниям дочернего ядра, для которых возможен выброс нейтрона. Так как константа распада по отношению к эмиссии этого «запаздывающего» нейтрона намного превышает константу р-распада, испускание нейтронов следует за р-распадом материнского ядра почти мгновенно и временная зависимость интенсивности запаздывающих нейтронов такая же, как у р-распада материнского ядра.

Более подробные сведения о делении ядер можно найти в [3—9].

40.2. БАРЬЕРЫ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Вероятность деления ядра (в капельной модели) при малых энергиях возбуждения МэВ связывалась с проницаемостью потенциального барьера, зависимость которого от деформации ядра б вблизи вершины предполагалась примерно параболической:

$$f^{(8)} = Brnax\text{-}const(6\text{-}6o)2,$$

где 6о —деформация, отвечающая максимальной высоте барьера Вта*.

Таблица 40.1. Барьеры деления Вд и В^ и глубина второй ямы £„ , МэВ [10]. Здесь и далее в круглых скобках указаны погрешности

Делящееся			
228Ra	8,0 (0,5)		8.5 (0,5)
226Ac	6,0 (0,6)		7.7 (0.3)
227Xh	5,9 (0.3)	–	6,6 (0.3)
228Th	6,2 (0.3)	–	6,5 (0,3)
229Th	–	–	6,5 (0,3)
230Xh	6,1 (0,2)		6,5 (0.3)
231Th	**6,0 (0,1)**	<5,8	6.1 (0.3)
232Xh	**5,8 (0,2)**	«4,5	6.2 (0.2)
233Xh	6,3 (0,2)	<6.2	6,3 (0.2)
234Th	6,1 (0,2)	–	6,5 (0,2)
23ipa	5,9 (0,2)	–	5,9 (0,3)
232pa	6,1 (0,3)	<5.7	6,2 (0,2)
233pa	6,1 (0,3)	–	6,1 (0,3)
232U	5,2 (0,2)		5,1 (0,3)
234U	5,6 (0,2)		5,5 (0,2)
235U	5,9 (0,2)	2,5 + 0.3	5.6 (0.2)
236U	5,6 (0,2)	2.3± 0,2	5.5 (0.2)
237U	6,1 (0,2)	2,5 ± 0,4	5,9 (0,2)
238U	5,7 (0,2)	2,6±0,1	5,7 (0,2)
239U	6.3 (0,2)	1,9±0.3	6,1 (0,2)
240U	5,7 (0,2)		5,5 (0,2)
234Np	5,5 (0,2)		5,1 (0,2)
236Mp	5,8 (0,2)	–	5,2 (0,2)
237Np	5,7 (0,2)	2.8±0,3	5,6 (0,2)
238Np	6,1 (0,2)	2.3±0,3	5,4 (0,2)
239Np	5,9 (0,2)	–	6,0 (0,2)
232pu	5,3 (0,4)		5,4 (0,2)
234PU	5,8 (0,7)		
235pu	–	2,6+0,4	5,1 (0.4)
236pu	–		4,5 (0,4)
237PU	–	2,8±0,2	
238PU	5.5 (0,2)	2,7 ±0,2	5,0 (0,2)
239PU	6,2 (0,2)	2,6 + 0,2	5,5 (0,2)
240pu	5,6 (0,2)	2,4 d= 0,3	5,1 (0,2)
24ipu	6,1 (0,2)	1,9 + 0,3	5,4 (0,2)
24 2PU	5,5 (0,2)		5,1 (0,2)
243pu	5,9 (0,2)	1,7 + 0,3	5,2 (0,2)
244pu	5,4 (0,2)		5,0 (0,2)
245PU	5,6 (0,2)		5,0 (0,2)
Am	–	2.4 + 0.2	
238AIII		2,6± 0,2	
239 Am	6,2 (0,3)	2,4±0,2	
240Am	6,5 (0,2)	3,0 + 0.2	5,2 (0,3)
24iAm	6,0 (0,2)	2,2±0,2	5,1 (0,3)
242 Am	6,5 (0,2)	2,9 + 0,2	5,4 (0,3)
243Am	5,9 (0,2)	2,3± 0,2	5.4 (0.3)
244 Am	6,3 (0,2)	2,8±0,4	**5,4 (0,3)**
	5,9 (0,2)		**5,2 (0,3)**
247Am	5,5 (0,2)		
24iCm	6.3 (0,3)	2,1 ± 0,3	4,3(0.5)
	5.8 (0,4)		**4,0 (0,5)**
2«Cm	6,4 (0,3)	1,9±0,3	
244Cm	5,8 (0,2)		4,3 (0,3)
	6.2 (0,2)	2,1 zh 0,3	
	5.7 (0,2)		4,2>.3)
«'Cm	6.0 (0,2)		
2«Cm	5,7 (0,2)		
^*Cm*	5,6 (0,2)	—	
250Cm	5,3 (0,2)		
249Bk	6,1 (0,2)		
250Bk	6,1 (0,2)	–	4,1 (0,3)

продолжение табл. 40.1

Делящееся ядро			
260Cf 253Cf 260ES	5,6 (0,3) 5,4 (0,3) 6,7 5,7		

Таблица 40.2. Высота барьеров деления Вшах ядер от 2i3At до "sxb [11]

Составное ядро		Составное ядро	
	17,3	w'Au	23,4-25,1
212At	18,6	196Au	22,5-23,9
212po	19,6	195Au	20,8-22,9
2ирo	20,5-20,6	is^Au	20,1-21,7
210po	21,2	isopt	24,9-26,3
20spo	21,1	194pt	22,8-24,4
208po	19,9	193pt	22,7-24,2
2(Hpo	19,3	192pt	21,4—23,1
210Bi	24,2-24,4	19ipt	20,8—22,5
208Bi	23,6—24,1	161 Ir	23,2
20,Bi	22,8-22,9	190 Ir	22,6—22,9
206Bi	i22,4	189 Ir	22,0-22,1
208pb	27,4	188 Ir	22,2
207pb	26,9-27,0	WOS	25,6
206pb	25,3	1880s	24,4
206pb	24,6	i"Os	24,6-24,8
204pt,	23,2-23,8	iseos	24.1
201X1	23,1	1860s	24,0
200TI	22,8	i8BRe	26,2
200Hg	23,5-24,6		26,3
199Hg	23,1-24,7	i i"Re	19.0 [12]
		j	28,3
198Hg	21,4-22,7	183 Yy	28.3
	21,1-22,7	182XV	27,4
"OHg	19,7-21,2	181W	26,9-27,0
		180W	26,5-26,6
198Au	23,7-24,9	179W	25,8
		i7»Ta	28,6
		™LU	30,5
		173Yb	33,4
		i70Yb	30,6
		153Tb	28,9 [12]

Обнаружение в недавнем времени ряда новых явлений (спонтанно делящихся изомеров, широких подбарьерных резонансов, групп узких резонансов с большой парциальной делимостью и других) привело к представлению о более сложной, двугорбой структуре барьера с максимумами высотой *Ва* И *Ве* при деформациях соответственно 6а-0,4 и бв«0,8. Седловина между максимумами располагается при значении бц==0,6, а дно этого минимума расположено на Ец выше основного состояния [10].

В табл. 40.1 приведены параметры двугорбой структуры барьеров тяжелых ядер (z>88), а в табл. 40.2— значения Втах для ядер с Z<85, с одногорбым барьером деления. Внутренний барьер *Ва* ядер от Th до Fin равен 5—6 МэВ.

Барьеры деления ядер с Z<85 увеличиваются с уменьшением Z^/A. Для еще более легких ядер модель жидкой капли предсказывает увеличение барьера деления, прохождение его через максимум в области ядер молибдена и затем уменьшение до нуля при *Z^jA—>*-0.

40.3. СПОНТАННОЕ ДЕЛЕНИЕ

В табл. 40.3 и 40.4 приведены периоды спонтанного деления ядер из основного и изомерных состояний.

В табл. 40.3 приведены значения периодов спонтанного деления ядер из основного состояния изотопов трех природных и пятнадцати синтезированных элементов. Период полураспада уменьшается на ~31 порядок от Th до Ки, а далее слабо изменяется. Там же приведены значения чисел мгновенных нейтронов и кинетической энергии парных осколков при спонтанном делении ядер Кроме того, в таблицу включены сведения о новом типе радиоактивности — спонтанном расщеплении с испусканием фрагментов типа "С в случае ядер франция и радия и ^^Ne в случае урана. В этих случаях (отмеченных звездочкой) вместо 7"/2 приведена доля распадов на тяжелые фрагменты по отношению к испусканию а-частиц. В столбце £к для этих случаев приведены значения кинетической энергии этих фрагментов.

В табл. 40.4 приведены значения периодов спонтанного деления из изомерного состояния во второй яме для ядер от и до Вк. В сравнении со спонтанным делением из основного состояния в первой яме спонтанное деление из изомерного состояния имеет гораздо меньшие времена жизни, что связано со значительно меньшими значениями величин и ширин внешнего барьера *Ве.*

а 40.3. Периоды полураспада ядер T^j^ из основного состояния путем спонтанного деления, средние числа мгновенных нейтронов ~„гн и средние кинетические энергии осколков деления

Элемент	*A*	^1/2	^мгпПВ]	*E*^, МэВ [19]
g-Fr	221	<4,4.10-12*	—	31,3 [35]
ggRa	221	<4,4-10-12*	–	32,4 35]
	222	3,7 (6)-10-10*	–	33,0 35]
	223	6,1 (10)-10-10*	–	31,9 [35]
	224	4,3 (12)-10-11*	–	30,5 [35]
9oTh	230	1,5 (15)-10" лет	1,24 (15)*1 [20]	
	232	> 1,0-1021 лет	2,13(20) [21]	
«Pa	230	> 10" лет [20]		
	231	1,1-10" лет	–	
	232	7,8 (60)-1013 лет	–	
	232	2,0 (5)-10-12*	–	32,8 [36]
	233	1,2(3)-10" лет	–	
	234	1,42 (8). 1018 лет	1,63(15)*1 [20]	
	235	9,8 (28). 1018 лет	–	
	236	2,43 (13). 10" лет	1,89 (5)	
	238	8.08(26)-10" лет	1,98 (3)	168,2 (И)
	228	10» лет [22]	–	
«3Np	237	1018 лет	–	
	239	>5-1012 лет [20]	–	
94PU	236	3,5 (10)-10» лет	2,21 (18)	
	238	4,77 (13). 10" лет	2,24(8)	
	239	7,8(16). 10" лет		
	240	1,15 (4). 10" лет	2,17(1)	180,4 (3)
	241	> 3-101» лет	–	
	242	6,84 (8)-10" лет	2,153(19)	179,96(20)
	244	6,56 (32). 10" лет	2,30(19)	181,8 (10)
«5 Am	232	10^ лет [22]	–	
	234	10« лет [22]	–	
	240	10W лет [22]	–	
	241	1,06^3)-10" лет	–	
	242	8,8 (33). 10" лет	2,42(14)*1 [20]	
	243	3,35 (31). 1013 лет	–	
	244	10" лет [22]	–	
ggCm	240	1,9.10® лет	–	
	242	6,5 (6). 10® лет	2,538(12)	
	244	1,344 (2). 10' лет	2,696 (10)	181,5 (lOi
	246	1,81 (4)-10' лет	2,950(14)	184,2(5)
	248	4,11 (4). 10" лет	3,157(15)	182,5(9)
	250	1,13 (5)-10« лет	3,17(8)	179,1 (27)
e,Bk	246	2.1013 лет [22]		
	349	1,864 (87). 10» лет	3,39^(26)	
98Cf	246	1,83-103 лет	3,14 (9)	196,6
	248	7-103 лет		189,3 (30)
	249	6,98 (15). 10" лет	–	
	250	1,70 (7)-104 лет	3,51 (4)	187.0 (5)
	252	85,38(39) года	3,7675 (40)	186,3(10)
	254	0,1656(5) года	3,83(5)	188,3 (20)
99ES	253	6,42 (22). 10» лет		191.3(30)
	254	>2,5-10' лет	–	
	255	2,44 (14)-103 лег	–	
looFm	242	0,82.10-3c	–	
	244	3,3-10-3c	–	
	246	15 с		199,6(40)
	248	3,6-104 с	–	198,7 (40)
	250	10 лет	–	
	252	115 лет		
	254	228(1) сут	3,98 (19)	194,9(10)
	255	~ 104 лет	–	
	256	2,6 ч	3,74 (18)	198,2(5)
	257	131 (3) гоа	3,796 (14)	197,6
	258	0,38 мс	–	238[1Jя
	259	1,5 с	—	245,2(60)

Продолжение табл.

Элемент	А	^1/2	^мги 118]	МэВ [18]
loiAW	**255**	**^5-10-'' лет**		
	256	**^ 10-2 лет**	–	—
	257	**> 6 сут**	–	—
	259	**95 мин**		**203,9 (14)**
lo^No	**250**	**0,25-10-3 с**		
	252	**~ 8 с**	**.4,15 [23J**	**202,4**
	254	**- 2 4 ч**		
	256	**103 с**		
	258	**1,2-10-=' с**		
юзЬг	**256**	**> 10S с**	—	
104KU	**254**	**5-10-« с**	—	
	255	**- 4 , 5 с**		
	256	**7-10-3 с**		
	257	**47 с**		
	258	**13(3)-10-3 с**		
	259	**3 с**	–	
	260	**0,02-0,08(16, 34]**		!99
	261	**70 с**		
	262	**47-10-3 с**		
105NS	**257**	**> 8**		
	260	**~ 15 с**		
	261	**~ 7 с**		
	262	**47 с**		
106	**259**	**> 2 с**		
	260	**7-10-3 G**		
	263	**~ 1 с**		
107	**261**	**10-2 с**	–	–

"" Значение экстраполировано от полученного при измерениях < пловыми или быстрыми нейтронами.

Таблица 40.4. Периоды полураспада ядер T^j^ из изомерных состояний путем спонтанного деления [22, 24] (в тех случаях, когда к одному нуклиду приведены два значения они относятся к разным изомерным состояниям)

Ядро		Ядро	^1/2-
		237 Дщ	5-10-9
238U	**> 10-9**	238АП1	**3,5-10-ь**
	1,95.10-7	23»An1	**1,6-10-'**
226Np	**60**	240Am	**9.10-«**
	4-10-8	**2«Am**	**1,5-10-е**
mpuP	3-10-8		**1,4-10-2**
иери	**3,4-10-8**	243Дщ	**5,5-10-''**
236pu	**3,7-10-и**		**1,0-10-3**
237Pu	**1,1-10-8**		**6,4-10-'**
237PU	**1,1-10-'**	246Am	**7,3-10-5**
236pu	**6-10-»**		**5,5-10-8**
	5-10-1"		**10-"**
239PЦ	**8.10-"**	**"iCm**	**1,5-10-8**
240pu	**3,4-10-»**		**1,8-10-'**
241pu	**3-10-8**		**5.10-"**
242pu	**2,1-10-5**	243Cm	**4,2-10-8**
	5-10-е		**> 1•10-'**
	3,6-10-9		**С 5-10-12**
243pu	**6-10-8**		**1,3-10-8**
244pu	**3,8-10-1''**	242Bk	**9,5-10-9**
246pu	**9 -10-8**		**6.10-'**
	85		**8,2-10-'**
234АП	**150**	24вВк	**2.10-9**

40.4. СЕЧЕНИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

В табл. 40.5 и 40.6 приведены сечения деления Of ядер под действием тепловых нейтронов. Значения, помеченные звездочкой, реколшидованы для энергии £„ = =0,0253 эВ (у=2200 м/с); — средняя энергия нейтронов деления. Значения, отмеченные буквой р, получены для распределения нейтронов в реакторе. На рис. 40.1—40.4 даны зависимости Ct (En) для основных делящихся ядер и 238U.

В **табл. 40.6 представлены сечения делений ядер при облучении тепловыми нейтронами. С ростом энергии нейтронов сечения деления хорошо делящихся ядер таких как ^^"Pu, ^^'Pu сначала спадают, испытывая ряд резонансных подъемов и при энергии нейтронов 1—5 МэВ образуют первое плато (рис. 40.1, 40.3, 40.4). Ядра второй группы, такие как ^^^Th, ^зви, 24орц_ ^^^Ри и другие, начинают хорошо делитьгя лишь при некоторой энергии выше Их сечения деления сначала круто возрастают, а затем достигают насыщения, первого плато. При повышении энергии нейтронов свыше 5 МэВ характер изменения сечения деления двух групп ядер подобен: при энергиях нейтронов ~ 8—14 .МэВ сечения деления образуют второе плато, затем третье и т. д .**

При презиционных измерениях в сечениях деления таких «пороговых» ядер как ^з^и, ^з^и, ^sITNp^ 24орц^

Таблица 40.5. Сечения деления of ядер под действием теп^вых нейтроиов и числа вторичных нейтронов v^rH. испускаемых на акт деления

Ядро-мишень	<1„ 10"» м^ [18]	•мгн [6,18]
223Ra	0,7 (3)	
	<5-10-5	
228Ra	< 2	
2"Ac	<2,9-10-^	
227Th	202 (13)	
22bJh	< 0 . 3	–
	30,8 (15)	2.08(2)
230Th	< 1,2-10-3	–
232Xh	2,5-10-e	2,12 (10)
233Th	15 (2)	
234Xh	<. 0,01	
гзсра	1500 (250)	
23Ipa	0,020 (1)	
232pa	700 (100) р	
2ззра	< 0 , 1	–
234pam	< 5 0 0	
234pair	< 5 0 0 0	
230U	25 (10)	
231 и	400 (300)	
232U	76,8(48)*	
233U	529.1 (12)* [25]	2,480 (7)
234U	< 0 , 6 5	
235U	582,6(11)* [25]	2,407 (7)
236U	0,07*	2,338 (22)
237U	< 0 . 3 5	–
238U	(4^П)-10-в	–
239U		—
234Np	ЭОО^ШЮ)	
236Np	2500 (150)	3,12(74)
23,N^	0,0215 (24)*	2,525 (16)
238Np	2088 (30)	–
236pu	170 (35)	–
237pu	2455 (295)	
23ьри	17,9 (4)*	2.900 (20)
239PU	748,0 (20)* [25]	2,874 (7)
240Pu	0,056 (30)	2,921 (12)
24ipu	1011,1 (62)* [25]	–
242pu	0,0007* [26]	–
243pц	196 (16)	–
	3,20 (9)*	–
242Ajnm	6950 (280)*	3,260 (24)
	2100 (200)	
	0,1983 (43)	3.214 (38)
244Дп,т	1600 (300)	
	2300 (300)	
	< 5	
	617 (20)*	3,430 (40)
	1,04 (20)*	–
	2145 (58)*	3,717 (60)
	0,14(5)*	–
^«Cm	81,9 (44)	3,79 (15)
	0,37 (5)	–
260Bk	960 (150)	
249C[	1642 (33)*	4,06 (4)
251Cf	4895 (250)	
252C[	32 (4)	–
253Cf	1300 (240)	–
254Esm	1826 (80)	–
	1966 (160)	–
255Fm	3360 (170)	–
257Fnl	2950 (160)	

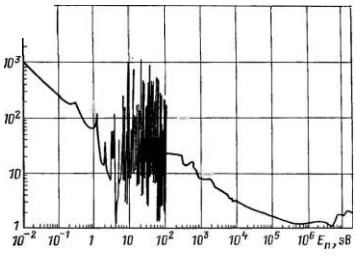


Рис. 40.1. -Зависимость сечения деления от энергии нейтронов [27]

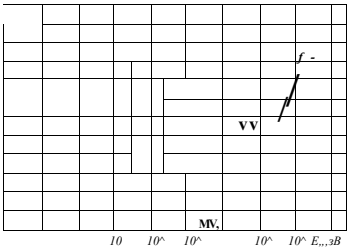


Рис. 40.2. Зависимость сечения деления от энергии нейтронов [27]

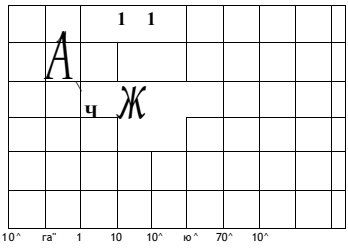


Рис. 40.3. Зависимость сечения деления от энергии нейтронов [27]

была обнаружена промежуточная структура, а у ядер и других — подбарьерные резонансы. Пример промежуточной структуры в сечении деления ядер ^звц приведен на рис. 40.2. Эти явления нашли объяснения в модели двугорбого барьера [3, 14]. В табл. 40.6 приведен ряд основных характеристик делящихся ядер при взаимодействии ^э^Ц 239рц_ 241рц р тепловыми нейтронами. Значения сечений деления основных делящихся ядер при взаимодействии с нейтронами 0,1—20 МэВ приведены в [3].

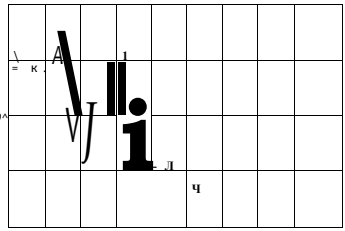


Рис. 40.4. Зависимость сечения деления 241рц от энергии нейтронов [27]

Таблица 40.6. Константы взаимопейг-г^ио делящихся ядер с нейтронами, имеющими скорость у = 2200 м/с [25]

о., , 10-28	45,5 (7)	98,3 (8)	269,3 (22)	358,2 (51)
Of, 10-28	529,1 (12)	582,6 (И)	748,0 (20)	1011 ,1 (62)
˚яогл. 10 - ,	574,7 (10)	680,9 (И)	1017,3 (29)	1369,4 (77)
^мгн [oj	2,480 (7)	2,407 (7)	2,874 (7)	2,921 (12)
^вал	0,0066 (30)	0,01659 (55)	0,00622 (32)	0,01563 (160)
£„, МэВ	2.4933 (39)	2,4251 (34)	2,8768 (57)	2,9369 (73)
	2,0627 (248)	2,0266 (220)	2,0990 (232)	2,0858 (232)

40.5. ЭНЕРГИЯ, ВЫДЕЛЯЕМАЯ ПРИ ДЕЛЕНИИ

Суммарная энергия, выделяемая при делении ялрп **складывается из следующих составля^их кинетической энергии осколков деления**

энергии мгновенных "г-квантов Е^ „гн;
энергии нейтронов деления £„;
энергии (3-излучения продуктов деления ;
энергии Y-излучения продуктов деления £т ;
энергии, уносимой антинейтрино при р-распадах *EZ*

'^^сн^ГзТпа'здГа^Ги" ^^^^^ МэВ (среднее значение а одно деление; энергия ~~дешающими нейтронами~~, £„ ^^^ ю кэВ в табл.40.7 не учтена)

Ядро-мишень	Часхицаи^е^ энергия.	Мгновенное излучение			Запаздывающее излучение			Литера-тура
is'Au	135	156		12	3		5	
адв!	175	171	90	12	3		5	
	P, 12	159	20	6	5	5		
	n, 3.35	161,8	4.7	6,1	8,1	7,86	10,9	199,46
	п, 14,0	161,8	7.4	6.1	7.2	6.99	9.7	199,14
	п, тепловая	171.5	4,9	7.6	5.1	4,9	6.8	200,8
	n, 0,5	169,4	4,9	7,6	5.0	4,9	6,8	198,6
	n, 14,0	169,4	7.5	7.6	4.3	4.1	5,7	198.6
	а, 30	176	36	8	3	4	5	
	п, тепловая	172.7	4.8	6.9	6.4	6.2	8,6	205.2
	n, 0.5	169.8	4.8	6.9	6.4	6,2	8,6	202,8
	n, 14,0	169.8	7.3	6.9	5,3	5,2	7,1	201.7
	n, 2,82	170,4	5.3	6,3	6,9	6,7	9.3	204.6
238U	п, 3,10	170,3	5.5	6,3	8.2	8,0	11,0	209.3
	п, 14.0	170,3	7.1	6.3	7.1	6,9	9,5	207.2
23,Np	и, 2,37	173.0	6,1	6.4	5.5	5,4	7.4	203.9
	п, тепловая	178.6	5.9	7,8	5,3	5.1	7,1	209.8
	п, 0,5	176.1	5,9	7,8	5.2	5.1	7,0	207,2
240pu	*n'* г^да	176,1	7,5	7,8	4.3	4.2	5,7	205,5
		179,0	6.2	6.5	5,7	5,6	7,7	207.7

Ядро-мишень	Частица и ее энергия, МэВ	Мгновенное излучение			Запаздывающее излучение			^лолн	Литература
			Я„		Яр		*Е*—		
24ipu	*n*, тепловая	175,4	6,0	7,9	6,5	6.4	8,8	210,9	[7]
	n, 0,5	175,6	6,0	7.9	6.5	6.3	8,7	211,0	
242pu	*n*, *2,32*	176,8	4,6	6,5	6.6	6.4	8,9	209,9	
252Cf	Спонтанное деление	190,0	7,4	8,4	6,0	5,9	8,1	225,8	
	То же	198	32	8	8	8	12		1

Энергия, уносимая антинейтрино, в виде тепловой не выделяется, поэтому на один акт деления ^gj,-ловыми нейтронами приходится около 196 МэВ, т. е. при мощности 1 Вт происходит примерно 3,2-10"' делений в секунду. При делении 1 кг ^^U выделяется энергия 8-10'з Дж.

В табл. 40.7 и 40.8, а также на рис. 40.5 приведены значения энергий, выделяемых при делении различных ядер.

Таблица 40.8. Средняя суммарная кинетическая энергия осколков деления ядер при взаимодействии нейтронами [19J

Ядро-мишень	Яд, МэВ	Ядро-мишень	МэВ
220Jh	162,7 (5)		177,5 (6)
23ipa	165,1 (5)		184.5 (5)
232U	169,3 (5)		189,4 (5)
237Np	171.0 (7)	251Cf	185,0 (27)
238pu	178.1 (5)		194.6 (5)
	180,0 (4)	255Fm	195,7(29)

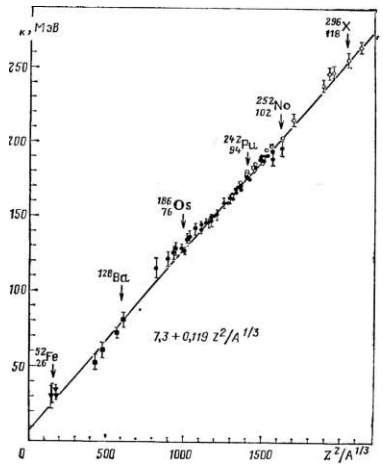


Рис. 40.5. Зависимость полной кинетической энергии £„ осколков деления от Z^jA^/^ делящегося ядра [28]

40.6. ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Независимым выходом называют непосредственный выход осколков при делении ядра Полный выход (рис. 40.6) складывается из независимого выхода и той доли, которая образуется в результате цепочки р-распадов.

В табл. 40.9 даны пробеги осколков деления ядер.

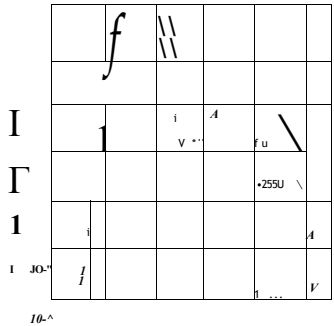


Рис. 40.6. Полные выходы продуктов деления, образующихся при делении ^^U, ^U и ^^Pu тепловыми нейтронами (вся кривая нормирована на 200%) [20]

Таблица 4 140.9Н е Средние пробеги осколков деления ядер ^Ro в различных тормозящих [8] различных средах [6]
{Ни — пробег легкого осколка, Ят — пробег тяжелого осколка)

Тормозящая среда	+			2«Cf, спонтанное деление	
	Н	«л	«т		
Алюминий		4,17	3,22	4,16	3,44
Аргон [30]	4,123	4,45	3,84		
Вода	21 мкм [29]			–	
Воздух	2,16 см	2,45 см	2,03 см	2,32 см*2	1,90 см*2
Гелий [30]	1,252	1,38	1,14	–	–
Железо	4,22				
Коллодий	20 мкм [29]				
Лавсан		17,8 мкм	14,0 мкм*1		
Медь	5,08				
Никель	4,40	5,53	4,30	5,52	4,57
Серебро	—	7,33	5,50	7,28	5,82
Углерод	—	3,09	2,48	–	–
Уран	6,7 мкм [29]	10,64*2	8,44*2	–	–
Урана диоксид	9,9 мкм [29]		–	–	–
Урана окись-закись	13,7 мкм [29]		–	–	–
Цирконий		6,12	4,78	—	—

Пробеги при фотоделении ядер, = 20 МэВ.
Пробеги --Мо (RJJ) и "^Ва соответственно.

40.7. НЕЙТРОНЫ ДЕЛЕНИЯ

Энергетические спектры мгновенных нейтронов деления различных ядер сходны. В простейшем виде, в пределах погрешностей эксперимента, спектры нейтронов деления могут быть представлены максвелловским распределением

$$N(E) = \{ 2 / V ^) \ УГexp (- £/fi),$$

где энергия нейтрона в лабораторной системе координ£г,_а параметр 6 связан со средней энергией спектра *E:* £ = 36/2 (табл. 40.10).

Таблица 40 10. Средние энергии Е энергетических распределений мгновенных нейтронов для различных ядер

Ядро	Вид деления	я, МэВ
233U	Тепловыми нейтронами	2,0627 (248) [25]
236U	То же	2,0266 (220) [25]
239pu		2,0990 (232) [25]
24«pu	Спонтанное	1,86 [20]
24,pu	Тепловыми нейтронами	2,0858 (232) [25]
262Q	Спонтанное	2,1409

Среднее число мгновенных нейтронов v„rH, возникающих при делении ядра, имеет тенденцию увеличиваться с возрастанием энергии нейтронов E_n, вызывающих деление (рис. 40.7). Эта зависимость может быть представлена выражением $y(E_n)=\nu_-(-aEn,md,$ Vo — среднее число мгновенных нейтронов при делении тепловыми нейтронами. **Параметр с«0,15, он слабо зависит от энергии нейтрона.**

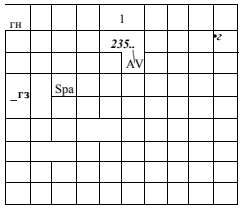


Рис. 40.7. Среднее число мгновенных нейтронов деления [21. 31], "зи [20], 235U [23. 31], ^» Ри [23, 32]

40.8. МГНОВЕННОЕ ^-ИЗЛУЧЕНИЕ

Энергия возбуждения осколков деления, остающаяся после испускания мгновенных нейтронов, обычно равна 3—4 МэВ/осколок. Это возбуждение осколков снимается испусканием мгновенных ^-квантов. Процесс излучения происходит за время порядка 1 0 - ® — с вслед за испусканием нейтронов.

Спектр •у-квантов и полные энергии fy поли мгновенных •у-квантов, образующихся при делении некоторых ядер, приведены в табл. 40.11 и 40.12.

Таблица 40. 11, Спектр мгновенных ^-квантов, сопровождающих деление ^зву тепловыми нейтронами [20]) - число 7-квантов, испускаемых при делении внутри энергетического интервала шириной 0,1 МэВ, Е^^Е^N(Е^)]

Е . МэВ	yV(E^)	Ядф, МэВ/деление
0,1	0,176	0,0176
0,2	0,815	0,1630
0,3	0,697	0,2091
0,4	0,661	0,2644
0,5	0,662	0,3110
0,6	0,553	0,3318
0,7	0,474	0,3318
0,8	0,408	0,2464
0,9	0,353	0,3177
1,0	0,310	0,310
1,1	0,272	0,2992
1,2	0,240	0,2880
1,3	0,205	0,2665
1,4	0,180	0,2520
1,5	0,158	0,2370
1,6	0,139	0,2224
1,7	0,125	0,2125
1,8	0,113	0,2034
1,9	0,102	0,1938
2,0	0,113	0,2260
2,1	0,0818	0,1718
2,2	0,0726	0,1597
2,3	0,0651	0,1497
2,4	0,0579	0,1390
2,5	0,0512	0,1280
2,6	0,0457	0,1188
2,7	0,0409	0,1104
2,8	0,0369	0,1033
2,9	0,0330	0,0957
3,0	0,0298	0,0894
3,1	0,0268	0,0831
3,2	0,0244	0,0781
3,3	0,0219	0,0723
3,4	0,0198	0,0673
3,5	0,0181	0,0634
3,6	0,0165	0,0594
3,7	0,0150	0,0555
3,8	0,0136	0,0517
3,9	0,0126	0,0491
4,0	0,0116	0,0464
4,1	0,0106	0,0435
4,2	0,00985	0,0414
4,3	0,00908	0,0391
4,4	0,00830	0,0365
4,5	0,00764	0,0344
4,6	0,00704	0,0324
4.7	0,00649	0,0305
4,8	0,00604	0,0290
4,9	0,00556	0,0272
5,0	0,00519	0,0260
5,1	0,00470	0,0240
5,2	0,00430	0,0224
5,3	0,00399	0,0217
5,4	0,00371	0,0200
5,5	0,00341	0,0188
5,6	0,00314	0,0176
5,7	0,00290	0,0165
5,8	0,00264	0,0153
5,9	0,00243	0,0143

Продолжение табл. 39.1 Продолжение табл. 39. i

$E_т$. МэВ	*N* (*Е*)	Едф, МэБ/деленве
6,0	0,00223	0,0134
6,1	0,00204	0,0124
6,2	0,00188	0,0117
6,3	0,00172	0,0108
6,4	0,00157	0,0100
6,5	0,00139	0,0090
6,6	0,00128	0,0084
6,7	0,00115	0,0077
6,8	0,00103	0,0070
6,9	0,000916	0,0063
7.0	0,000833	0,0058
7,1	0,000731	0,0052
7,2	0,000629	0,0045
7,3	0,000547	0,0040
7,4	0,000467	0,0034
7,5	0,000388	0,0029
7,6	0,000308	0,0023

Таблица 40.12. Полная энергия £^ ^ЭЩН мгновенных 7-квантов^ образующихся при делении некоторых ядер [20] (N^ — среднее число 7-квантов, приходящихся на одно деление, £„ — энергия нейтронов, ающих деление)

Ядро	Е^. МэВ	7V,	
235U	Тепловая	7,4 (8)	
	2,8		
	14,7		7.511)
236U	2,8		7,5(11)
	14,7		7,5(11)
2b2Ql	Спонтанное деление	10,3	8,2

40.9. ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

|5- и •у-Излучение продуктов деления, р- и •у-Излучение продуктов деления является следствием распада более 100 радионуклидов, поэтому часто рассматривают совокупное Р- или •у-излучение в момент времени *t* после деления, усредненное по многим актам деления. Зависимость интенсивности распада, МэВ с-'-деление-', продуктов деления от времени может быть приближенно представлена выражениями

$$Д, f t) ^ 1,4 \qquad A^ \quad (t)^{8,2}$$

где *t* — время после деления, с. Эти выражения справедливы для интервала 10<«10^ с с погрешностью ±20% (рис. 40.8—40.10).

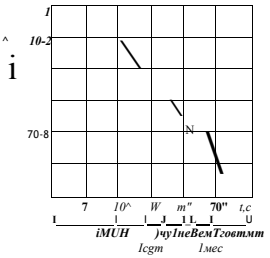


Рис. 40.8. Зависимость интенсивности Y-излучения продуктов деления от времени [20]

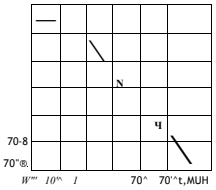


Рис. 40.9. Зависимость интенсивности Р-излучения продуктов деления от времени [20]

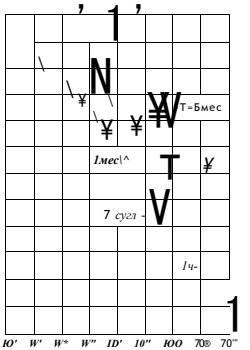


Рис. 40.10. Мощность источников •у-излучения — продуктов деления из активной зоны реактора, работавшего в течение времени *Т* с тепловой мощностью 1 ГВт [33]

Запаздывающие нейтроны. **Нейтроны, испускаемые возбужденными осколками деления, в соответствии с периодами полураспада родоначальников запаздывающих нейтронов условно делятся на группы. Чаще выделяют шесть групп (см., например, рис. 40.11 и табл. 40.13). Родоначальниками запаздывающих нейтро-**

Таблица 40. 13. Относительный /Q^H ВЫХОД запаздывающих нейтронов в группах на один акт при делении изотопов урана и плутония тепловыми нейтронами [20]

Нуклид	Номер группы		'отн
233U	1	55,00 (54)	0,086
	2		0,299
	3		0,252
	4	2Л3(20)	0,278
	5	0,615(242)	0,051
	6	0,277(47)	0,034
	Полный выход		1,000
235U	1	55,72(128)	0,033
	2	22,72 (71)	0,219
	3	6,22 (23)	0,196
	4	2,30(9)	0,395
	5	0,610(83)	0,11
	6	0,230(25)	0,042
	Полный выход		1,000
239PU	1	54.28 (234)	0,035
	2	23.04(1,67)	0,298
	3	5,60 (40)	0,211
	4	2,13(24)	0,326
	5	0,618(213)	0,086
	6	0,257 (45)	0,044
	Полный выход		1,000
2-рц	1	54,0(10)	0,009
	2	*fA^*	0,233
	3		0,176
	4		0,397
	5	1,97(10)	0,185
	6	0,43(4)	
	Полный выход		

нов обычно называют первые |5-активные осколки деления, а продукты распада осколков называются излучателями запаздывающих нейтронов. Периоды полураспада и выходы нейтронов для одного и того же делящегося ядра слабо зависят от энергии нейтрона (до £ « 5 МэВ), вызывающего деление. Полные выходы запаздывающих нейтронов приведены в табл. 40.14 и на рис. 40.12.

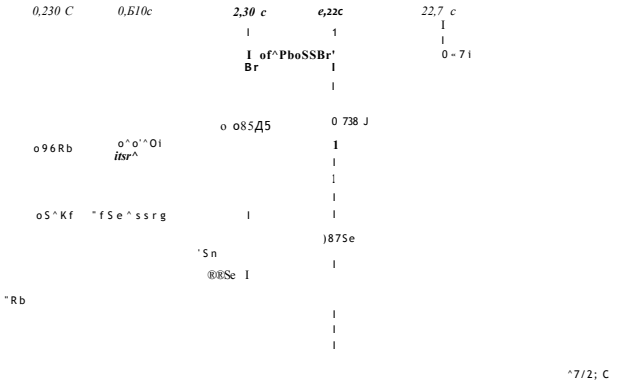


РИС. 40.11. Характеристики излучателей запаздывающих нейтронов

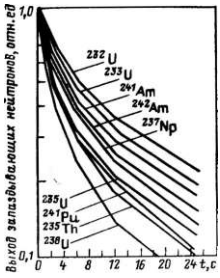


Рис. 40.12. Зависимость выхода запаздывающих нейтронов от времени для различных делящихся ядер [9]

Таблица 40.14. Число запаздывающих нейтронов на 100 делений и средняя энергия запаздывающего нейтрона £„ зап [32] [(т), (р), (14) означают деление ядер при облучении тепловыми, реакторными нейтронами и нейтронами с энергией 14 МэВ соответственно, (сп) — спонтанное деление ядра]

Ядро			Еп зап •
^^='Th	(р)	4,76 (0,34)	424,6
	(14)	3,03 (0,29)	457,9
233U	(т)	0,845 (0,066)	407,7
	(р)	0,916(0,089)	394,8
	(14)	0,708(0,095)	389,4
235U	(т)	1,77(0,081)	415,8
	(р)	1,98(0,18)	517,6
	(14)	0,978(0,097)	400,8
2звп	(р)	2,26 (0,19)	424,0
238U	(р)	3,51 (0,27)	421,9
	(14)	2,69(0,21)	428,5
237Np	(р)	1,28 (0,13)	418,5
239рп	(т)	0,769(0,058)	419,8
	(р)	0,724 (0,009)	412,9
	(14)	0,387(0,062)	383,2
^^OPu	(р)	0,923 (0,108)	416,6
241pu	(т)	1,58 (0,13)	428,1
	(р)	1,49(0,16)	426,7
	(р)	1,41 (0,14)	420,0
	(СП)	0,690(0,092)	409,8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hahn O., Strassmann F.//Naturwissenscho[ten, 1939 Prl 27, Heft 1. S. И 15.

2. Флеров Г. Н., Петржак К. А.//Журн. эксперим. теорет. физ. 1940. Т. 10, вып 9—10. С. 1013—1017

3. Обухов А. И., Перфилов Н. А.//Успехи физ. наук. 1967. Т. 92, вып. 4. С. 621—677.

4. Хайд Э. Деление ядер: Пер. с англ./Под. ред. В. М. Струтинского. М.: Атомиздат, 1969.

5. Vandenbosch R., Huisenga J. R. Nuclear Fission. N. Y. — London: Academic Press, 1973.

6. Горбачев В. М., Замятнин Ю. С., Лбов А. А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер: Справочник. М.; Атомиздат, 1976.

7. Michaudon A. Basic Physics of the Fission Process. Nuclear Fission and Neutron-Induced Fission Gross Sections/Ed. by A. Michaudon. Oxford. Pergamon Press, 1981

8. Пик-Пичак Г. А. Деление ядер//Физическая энциклопедия. М.; Сов. энциклопедия. 1988. Т. 1. С. 578—581

9. Гангрский Ю. П., Далхсурен Б., Марков Б. Н. Осколки деления ядер. М. Энергоатомиздат, 1986.

10. Bjornholm S., Lynn J. E.//Rev. Mod. Phys. 1980. Vol. 52, N 4, P. 725—931.

11. Игнатюк А. В., Смиренкин Г. Н., Иткис М. Г. и др.//Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1985. Т. 16, вып, 4. С. 709—772.

12. Plasil F., Awes T. C., Cheynis B. e. a.//Phys. Rev. C. 1984. Vol. 29, № 3. P. 1145—1148.

13. Proposed Recommended List of Heavy Elements Radionuclide Orcay Data//Ed. by A. Lorenz. INDC (NDC)-149/NE Vienna. IAEA, 1983. Part 1. Half-Lives. P. 5—12

14. Brown E, Firestone R. B. Tabbes of Radioactive Isotopes/Ed. V. C. Shirley. N Y.: A. Wiley—Intercience Publ. 1986.

15. Tuli J. K. Nuclei properties//Handbook on Nuclear Activation Data Tech. Rep. Vienna: IAEA, 1987 Ser. N 273. P. 3—27.

16 Sommerville L. P., Nurmia M. J., Nitschke J. M. e. a.//Phys. Rev. C 1985. Vol. 31, N. 5. 1801—1815.

17. Дружинин А. А., Полынов В. Н., Корочкин А. Н. и др.//Атомная энергия. 1985. Т. 56, вып. 1. С. 68—69.

18. Mughabhabh S. F. Neutron Gross Section. BNL-325. N. Y.: Academic Press, 1984. Vol. 1. Neutron Resonances Parameters and Thermal Gross Sections. Part B: Z=61-f-100.

19. Воробьева В. Г., Куз^минов Б. Д.//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 1975. Вып. 19. С. 16—41; 1985. Вып. 2. С. 27—30,

20. Таблицы физических величин: Спрявочник/Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

21 Малиновский В. В., Тарасько М. З., Кузьминов Б. Д.//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 1985. Вып. 1. С. 24—35; Вып. 2. С. 36—41; Атомная энергия. 1985. Т. 58, вып. 6. С. 430.

22. Флеров Г. Н.//Производство изотопов/Под ред. В. В. Бочкарева, Н. Е. Брежнева, Е. Е. Кулиша и др. М.: Атомиздат, 1973. С. 19—25.

23. Малиновский В. В., Воробьева В. Г., Кузьминов Б. Д.//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 1983. Вып. 5. С. 19—56.

24. Metag V.//Comments Nucl. Particle Phys. 1981. Vol. 10, N 2. P. 79—90.

25. Devadeenam M., Stehn J. R.//Ann. NucL Energy. 1984. Vol. 11, N 8. P. 375—404.

26. Коньшин В. А. Ядерно-физические константы делящихся ядер: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984

27. Asami T. Graphs of Evaluated Neutron Cross Sections in JENDL-2, JAERI-H-84-052. Japanese Nuclear Data Committee, Toaki, Ibaraki, 1984.

28. Viola V. E., Kwiatkowski K., Walker M.//Phys. Rev. C. 1985. Vol. 31, N 44. P. 1550—1552.

29. Steinberg M.//Nucleonics. 1963. Vol. 21, N 8. P. 151—153.

30. Rusticlelli F.//Z. Phys. 1973. Bd 262, N 3. S 211—220.

31. Howe R. E.//Nucl. Sci. Engng. 1984. VoL 86, N 2. P. 157—167.

32. England T. R., Wilson W. B., Scheuter R. E., Mann F. M.//Nucl. Sci. Engng 1983. Vol. 85, N 2. P. 139—155.

33. Бродер Д. Л., Попков К. К., Рубанов С. Н. Малогабаритная защита реакторов. М.: Атомиздат, 1967.

34. Друин В. А., Бочев Б., Короткин Ю. С.//Атомная энергия. 1977. Т. 43. Вып. 3. С. 155—161.

35. Price P. B., Stevenson J. D., Barwick S. W. e. a.//Phys. Rev Lett. 1985. Vol 54, N 4 P. 297—299.

36. Barwick S. W., Price P. B., Stevenson J. D. e. a.//Phys. Rev. C. 1985. Vol. 31, N 5. P 1984—1986.

Глава 41

ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

С. в. Марин

41.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В главе представлены ядерно-физические константы, характеризующие взаимодействие нейтронов с ядрами среды в энергетической области от 0,0253 эВ примерно до 20 МэВ. Перечень приводимых ядерно-физических констант далеко не полностью отражает всю совокупность существующих в настоящее время данных, и поэтому для получения информации, например, по параметрам резонансов, угловым и энергетическим распределениям вторичных нейтронов или другим данным следует обратиться к специальной справочной литературе или к библиотекам оцененных нейтронных данных В них приводятся рекомендованные значения ядерно-физических констант в форме, допускающей их периодическую переоценку, пригодные для использования в расчетах при решении широкого круга задач. К наиболее известным библиотекам оцененных нейтронных данных относятся ENDF/B [1], ENDL [2], UKNDL [3], KEDAK [4] и др. При поиске требуемой информации рекомендуется пользоваться библиографическим указателем по нейтронным данным CINDA — Computer Index of Neutron Data [5], принятым в 1965 г. в качестве основного документа для международного обмена библиографической информацией Подробное описание механизма ядерных реакций с участием нейтронов можно найти в работах по ядерной и нейтронной физике (см., например, [6—11]). Решение задач переноса нейтронов наиболее полно изложено в литературе по физике и технике ядерных реакторов [12—16].

41.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОНА

При рассмотрении процесса переноса нейтронов в среде учитывается, что времена, характерные для взаимодействия нейтрона с ядрами среды, значительно меньше его периода полураспада. Поэтому нейтрон в данном случае считается долгоживущей и устойчивой частицей.

В свободном состоянии нейтрон радиоактивен. Ниже приведены основные характеристики нейтрона:

масса покоя т„ = 1,674 9286(10)-10-" кг 117];

энергетический эквивалент массы покоя нейтрона

Ет„ =/п„с2=939,573 1(27) МэВ [11];

заряд —заряд электрона [181;

схема распада «о—»-р+-t-e--t-v;

период полураспада 7"i/2= 10,13(9)—10,69(13) мин

'^"^граничная энергия р-спектра Ergp = 782,43(4) кэВ

спин S„ = ±1/2 [11];

магнитный момент 1,913 042 75(45)цл. [17];

комптоновская длина волны Хс, к^МгПпс— = 1,319 590 9(22)-10-» м [17].

Верхняя оценка значения электрического дипольного момента нейтрона dn, полученная в экспериментах с ультрахолодными нейтронами, дает отношение *d„le<* <6-10^27 [И] Нейтрон принято считать электрически нейтральной или обладающей очень малым электрическим зарядом (порядка 10-" ^с) частицей.

Для нейтрона как элементарной частицы характерно проявление волновых свойств, для описания которых с частицей связывается волна с длиной к, м, определяемой соотношением де Бройля

$$X = /r/p = 2,86.10-"/К ёГ ,$$

где Л — постоянная Планка; *р* — импульс нейтрона; Еп — энергия нейтрона, эВ. Соотношение справедливо в случае малой релятивистской поправки (рис. 41.1). Отклонение от прямой линии наблюдается при энергиях выше 10® эВ и обусловлено релятивистскими эффектами при высоких энергиях. Волновые свойства наиболее отчетливо проявляются при низких энергиях; например, при £„ = 0,0253 эВ значение К сравнимо с размерами атома (табл. 41.1) Нейтроны таких энергий дифрагируют на кристаллической решетке подобно рентгеновскому излучению [19]

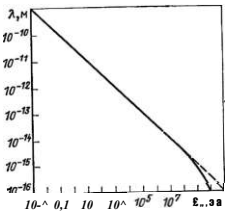


Рис. 41.1. Зависимость длины волны нейтрона от энергии [8]

Массовое число	*En<1000 эВ*	*1<.Ef,<S00K3B*	*0,S-^En<20 ШВ*
A<25	*Разрешенные резонансы*		
	Резонансное рассеяние, реакции (n,p), (n,oc), (n,2n)		
Z5<A<80	*Разрешенные \резонансы*	*ПерекрыВающиеся резонансы*	*Непрерывный спектр*
	Потенциальное рассеяние	*Резонансное рассеяна е, радиационный захват*	*\Реакци,ии (n,p), (n,a) и (n,2n)f*
A >80			
	Радиаа,ионный захват	*Неупругое рассеяние,*	

Рис. 41.2. Систематика ядерных реакций с участием нейтронов [9]

Таблица 41.1. Некоторые характеристики нейтронов различных анергий [8]

Группа		Энергия, эВ	Температура, К	Скорость, м/с	Длина волны, м
Ультрахолодные	(< Ю"' эВ)	10-'	1,1-10-3	0,44	0,9-10-8
Холодные	(10-7—10-2 эВ)	10-3	11,6	4,37-102	9,04-10-W
Тепловые	(0,01-0,1 эВ)	0,0253	293	2200	1,80-10-1»
Резонансные	(0,1-50 эВ)	1,0	1,16-10'	1,38-10«	2,86-10-"
Медленные	50—500 эВ)	100	1,16-108	1,38-10»	2,86-10-12
Промежуточные	500—10^ эВ)	104	1,16-108	1,38-10"	2,86-10-13
Быстрые	(10-i-1О' эВ)	10«	1,16-10"	1,38-10'	2,86-10-14
Больших энергий	(10'—Ю» эВ)	103	1,16-10«	1,28.10«	2,79.10-1§
Релятивистские	(> 10» эВ)	10»"	1.16-1ow	2,99-108	1,14-10-1в

Энергией нейтронов определяется вид их взаимодействия с ядрами среды {рис. 41.2). При анализе данных, представленных на рис. 41.2, следует учитывать, что границы энергетических интервалов носят условный характер и перекрываются

41.3. НЕЙТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ

Для описания ядерных реакций под действием нейтронов используется запись [20]

$$n + X - ^{\wedge} \quad Y + 6 + Q,$$

qIO соответствует взаимодействию нейтрона с ядром X, в результате чего образуются ядро Y и частица Ь, которая может быть сложным ядром. Тепловой эффект, или энергия реакции Q, равна разности масс частиц до и после реакции:

$$\boldsymbol{Q = Eb + Ey - En,}$$

где B***y a*** Eb — кинетические энергии продуктов реакции.

Если Q>0, то реакция называется экзоэнергетической и протекает при любой кинетической энергии нейтрона. Если Q<0, то реакция эндоэнергетическая, она не может происходить до тех пор, пока энергия нейтрона не превзойдет значения, называемого пороговой энергией реакции Enov-

$$\pounds nnt,= \begin{cases} |Q| \text{ в системе центра масс (СЦМ);} \\ |Q|(M+1)/JM \text{ В лабораторной системе координат (ЛСК),} \end{cases}$$

где ***M*** — масса ядра X, выраженная в нейтронных массах.

Микроскопическое сечение взаимодействия ст, реакции типа ***i*** рассматривается как число событий данного типа £ в единицу времени, отнесенное к одному ядру вещества и деленное на число частиц, попадающих в единицу времени на поверхность единичной площади. В расчетах часто используется величина

$$2г = рст,$$

где Si — в см-<; р — концентрация ядер в веществе, г/см®; Gi — микроскопическое сечение, см^. В литературе по нейтронной физике иногда встречается внесистемная единица сечения барн, которая связана с единицей СИ соотношением 1 м^. Макроскопическое сечение 2; рассматривается как вероятность нейтрона испытать акт рассеяния или поглощения на отрезке длиной 1 см.

Полный результат взаимодействия может быть представлен как сумма эффектов упругого рассеяния и неупругих взаимодействий либо как сумма упругого и неупругого эффектов рассеяния и эффекта поглощения нейтронов. Неупругое взаимодействие включает в себя неупругое рассеяние и поглощение нейтронов.

Приведем символическую запись (рис. 41.3):

полное сечение cTot = a,,,,-fcr*=aa-4-aaЬв;

сечение рассеяния as = an,n+an

сечение неупругих взаимодействий ax=Ов,п'-|-aab5,;

сечение поглощения 0abs = On,f-fст,,,2,,+a,,,зг.-1-Оп,,,р +

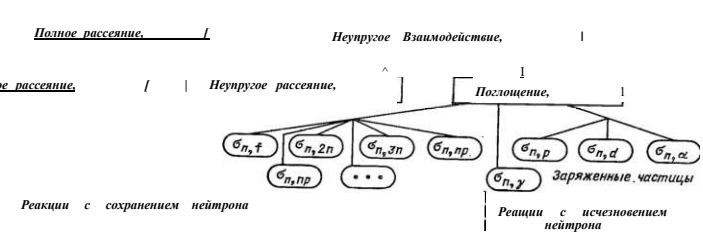


Рис. 41.3. Схема взаимосвязи нейтронных сечений [26]

сечение процессов, приводящих к испусканию нейтронов, **Oxra = 0„„„' +2o„.2„+ 3O„3/i+V0n**.t+<Tn/>p+ ...;

сечение процессов, связанных с образованием нейтронов, ар = а„.„ + стст-

Здесь и Оп.п' — сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов; Спзп и а^.з» — сечения реакций (п, 2и), (и, 3rt); сГ„f _ сечение деления; an.it—сечение радиациониого захвата; 0„,р, *п.а,* Оп.^, $O_{1,m}\prod_{n,...}$ — сечения реакций **(n, p, (n, d), (n, a), (n, np), ... соответственно;** V — средний выход нейтронов при делении.

41.4. МЕХАНИЗМ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ С УЧАСТИЕМ НЕЙТРОНОВ

Ядерные реакции, происходящие при столкновении нейтронов с ядрами, характеризуются большим разнообразием и зависят от индивидуальных особенностей сталкивающихся частиц и энергии их относительного движения. Всю совокупность ядерных реакций условно можно разделить на две группы: реакции с образованием составного ядра и прямые ядерные реакции. Система, образующаяся из поглощенного нейтрона и ядра мишени и находящаяся в сильно возбужденном состоянии, называется составным ядром. Время жизни составного ядра составляет около Ю"" с, а энергия возбуждения равна сумме кинетической энергии и энергии связи поглощенного нейтрона. Энергия возбуждения составного ядра распределяется среди большого числа степеней свободы.

Согласно современным представлениям о ядерных реакциях считается, что процесс протекает в две стадии: образование составного ядра и распад составного ядра на продукты реакции, т. е.

$$n + X\text{-}^{C}\text{-}Y + b,$$

где С —составное ядро, образующееся в промежуточной стадии. Распад составного ядра зависит от энергии, момента количества движения и четности и не зависит от способа образования составного ядра

Однако возможен процесс, когда нейтрон, сталкиваясь с отдельным нуклоном ядра-мишени, с большой вероятностью покидает ядро без взаимодействия с другими нуклонами. Такой процесс называется прямой реакцией. В отличие от ядерной реакции с образованием составного ядра, когда возбуждается большое число степеней свободы, в прямой ядерной реакции возбуждается немного степеней свободы. При энергиях налетающих нейтронов меньше 20 МэВ вероятность этого процесса мала.

Реализуются также ядерные реакции, носящие промежуточный характер между прямыми реакциями и реакциями с образованием составного ядра. Ядро может распасться и до того момента, когда энергия, вносимая захваченной частицей, распределяется между всеми нуклонами ядра (предравновесный распад).

Распад составного ядра может происходить несколькими способами: с испусканием нейтрона той же энергии, что и поглощенная (упругое или резонансное рассеяние); с испусканием одного или нескольких у-квантов (радиационный захват); с испусканием заряженных частиц или нейтронов в случае достаточно больших энергий возбуждения.

Отличительной особенностью ядерных реакций с образованием составного ядра при малых энергиях нейтронов (менее 1 МэВ) является наличие резонансов в энергетической зависимости сечений. Резонансное рассеяние обусловлено внутренней областью ядра, в то время кяк потенциальное рассеяние — поверхностью ядра. В этой области энергий наиболее существенны процессы с упругим рассеянием и радиационным захватом нейтронов. Другие процессы либо запрещены энергетически, либо характеризуются малой вероятностью. Неупругое рассеяние невозможно, если энспгия падающего нейтрона меньше энергии возбуждения ядра (для ядер со средними массовыми числам збуждения, как правило, превосходит несколько десятков мегаэлектрон-вольт) Реакции (я, ***p),*** (и, ***a)*** и другие маловероятны из-за наличия кулоновского барьера, который препятствует испусканию заряженных частиц с малой энергией

При взаимодействии нейтронов тепловых и резонансных энергий с ядрами тяжелых нуклидов наиболее существенны упругое рассеяние и радиационный захват, для некоторых тяжелых нуклидов — деление. Если энергия нейтронов выше 1 МэВ, то возможными становятся другие ядернь^е реакции, такие как неупругое рассеяние, реакции с испусканием заряженных частиц

Процесс упругого рассеяния нейтрона представляется состоящим из двух частей; чисто резонансного с образованием составного ядра и потенциального рассеяния, при котором нейтрон не проникает в ядро, а отражается от его поверхности. Резонансное и потенциальное рассеяния когерентны и интерферируют. Согласно формуле Брейта — Вигнера для упругого рассеяния

$$; (E) = \frac{\Gamma?}{\{E\text{-}E^{\wedge} \quad Y+(T/2\Gamma}{E\text{-}E_{n}} + 4z.a^{\wedge} + 47iX\Gamma_{n}o$$

где К — приведенная длина волны де Бройля ***{X='k12n);*** Г и Г„ - полная и нейтронная ширины резонансов (Г = Г„Н-Г-у— ширина уровня, которая складывается из парциальных ширин: Г„ — нейтронной ширины и Г т — радиационной ширины; отношения Г„/Г и Гт /Г— вероятности упругого рассеяния с образованием составного ядра и радиационного захвата соответственно; ширины резонансов берутся на половине высоты сечения в резонансе и выражаются в энергетических единицах); *Er* — энергия резонанса; ***a*** — эффективный радиус ядра. Первое слагаемое соответствует резонансному рассеянию, второе — потенциальному рассеянию, третье — интерференции процессов потенциального и резонансного рассеяния. Видно, что при интерференционный член в формуле принимает отрицательное значение, что соответствует уменьшению сечения вслед ствие интерференции [9, 12].

Полное сечение рассеяния нейтрона часто рассматривается в виде суммы когерентного и некогерентного сечений [8]:

$$°s = °s\ coh \qquad °s\ noncoh\text{-}$$

41.5. СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ НЕЙТРОНОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

В табл. 41.2—41.4 приведены сечения ядерных реакций для нейтронов тепловых энергий (0,0253 эВ), полученные экспериментально или в результате сопоставления данных различных авторов.

В первой колонке указаны символ элемента и массовое число. Если массовое число отсутствует, то сечение проводится для естественной смеси изотопов данного элемента. Во второй колонке в случае долгоживущего

Таблица 41.2. Сечения поглощения и рассеяния для нейтронов с энергией 0,0253 эВ (элементы с атомными номерами 1—60) [21]

Символ и массовое	Содержание в естественной смеси, %. или (и)	Концентрация ядер р, ю»^ см-»				"s noncoh) 10-2» „!
H 1	99,985	5,37-10-fi	0,3326 (7)	20,491 (14)	0,439 (3)	20,052 (14)
2	0,0148	–	0,519 (7)-10-3	3,390 (12)	2,484 (5)	0,906 (13)
He	–	2,68-10-6	–	0,76 (1)		
3	0,000138	–	0.031 (9)-10-3	3,10 (13)	2,48 (4)	0,62 (12)
4	99,999862	–	–	0,76 (1)		
Li	–	0,0464	0,0448 (30)	0,95 (4)	—	**0,25 (4)**
			70,5 (l,9)*^bs)			
6	7,52		0,0385 (30)	0,75 (2)	0,45 (8)	0,30 (8)
			940 (4)(«'			
7	92,48	–	0,0454 (3)	0,97 (4)	0.51 (1)	0,46 (4)
Be 7	53,30 сут	–	48 ОСО (9000) P>	–	–	–
9	100	0,1236	7,6 (8)-10-8	6,151 (5)	–	0,004 (1)
B		0,136	0,10 (4)	4,27 (7)	3,01 (5)	1,26 (3)
10	19,8		0,5 (2)	2,23 (6)	0.1180 (3)	2.11 (8)
			3837 (9)<®bs)			
n	80,2	^	5.5 (3,3)-10-3	**4,84 (4)**	4,69 (3)	0.15(3)
C	–	0,08023	3,50 (Л-Ю-:®	4,740 (5)		0,3 (1)-10-3
12	98,89	–	3,53 (7)-10-3	4,746 (2)	–	–
13	1,11	–	1,37 (4)-10-3	4,19 (J2)	4,16 (12)	0,029 (10)
14	5730 лет	:	<0,001	–	–	–
N		5,38.10-6	74,7 (7,3)-10-3	10,03 (8)	9,60 (4)	0,45 (11)
			1,90 (3)<^bs)			
14	99,63	-	75,0 (7,5)-10-3	10,05 (12)	-	0.46 (5)
15	0,366		0,024 (8)-10-3	4,59 (5)		3,5-10-3
0		5,38-10-6	0,19 (2)-10-3	3,761 (6)	3,761 (6)	–
16	99^60		0,190 (19)-10-3	3,761 (6)		
17	0,038		0,538 (65)-10-3	3,61 (6)	z	0,007 (2)
			0,235 (10)<^bs>			
18	**0,202**		**0,16 (1)-10-3**			
F 19	100	5,39-10-6	**9,6 (5)-10-3**	3,641 (10)	3,641 (10)	0,40 (2)-10-3
Ne		2,69-Ю-^^	**39 (4). 10-3**		–	0,015 (5)
20	90,51	–	**37 (4)-10-3**	2,47 (3)	–	–
21	0,27	–	0,666 (ПО)	5,1 (3)	–	–
22	9,22		45,5 (6.0)-10-3	1,705 (9)		
Na 23	100	o,025-11	0,530 (5)	3,025 (2)	1 (2)	1,^(3)
			0,400 (30)			
Mg		0,04310	**0,063 (3)**	**3,4140 (24)**		0,046 (6)
24	78,99		**0,051 (5)**	**3,74 (4)**		
25	10.0		**0,190 (30)**		1,54 (12)	0,023
26	11,01		**0,0382 (8)**	**2,83 (17)**	–	–
27	**9,46 мин**		0,07 (2)			
Л1 27	**100**	0,06024	231 (3)-10-з	1,4134 (10)	-	9,Г(6).10-»
Si		0,04996	0,171 (3)	2,0437 (17)		0,009 (2)
28	**92^3**		0,177 (5)	1 ,992 (6)		
29	**4,67**		0,101 (14)			
30	**3,10**		0,107 (2)	2,49 (4)		
g		0,03539	0,172 (6)	3,134 (10)		0,006 (4)
		0,03950	0,52 (1)	0,9787 (50)	**0,9733 (50)**	5,4 (7)-10-3
			8 (4)-10-з<«'			
32	95,02		**0,53 (4)**	0,9432 (21^	–	–
			7 (4)-10-з<"'			
33	0,75	–	0,35 (4)	2,8 (7)	2,7 (2)	-
			2 (1)-10-з<"' P)			
			190 (80)-10-3		1,45(3)	
34	4,21		227 (5)-10-3			
Cl		5,45-10-^	33,1 (3)	15^ (2)		4,9 (2)
			0,37 (2)<«- P>			
			33,5 (3)<^Бз)			

Символ и массовое число	Содержание в естественной	Концентрация ядер р. 1(Р" см->				
35	75,77	-	43,6 (4) 0,489 (14)<"- Р'	20,6(3)	16,32 (25)	4,24 (25)
36	3,00-105 лет	—	0,08 (4).10-з(«' <10,0	—	—	—
37	24,23		0,433 (6)	1,15(5)	<0,08-10-3	—
Ar		2,68-10-S	0,675 (9)	0,647 (3)	—	0,209 (2)
36	0,337		5,2 (5)	73,7 (4)	—	—
		-	5,5 (1)- 10-3 (Па)		-	-
*S*7	35,0 сут		69 (14)<"' Р)			
			1970 (330)			
38	0,063	—	0,8 (2)	1,5(1,5)	—	—
39	269 лет	—	600 (300)		—	—
40	99,60	—	0,660 (10)	**0,40 (2)**	—	—
K		0,01325	2,1(1)	2,04 (10)		0,37 (10)
39	93,258		2,1 (2)		-	0,34 (10)
			4,3(5)-10-3(«. ">			
40	0,0117		30(8)			
	1,28.10" лет	-	4,4 (3)<"' Р>			
			0,39 (3)<"'			
41	6,730	—	1,46(3)	—	—	0,7 (2)
Ca		0,02329	0,43 (2)	2,93 (4)	—	0,025 (3)
40	96,94		0,41 (2)	3,01 (8)		
			2,5 (1,1).10-3(«. ~)			
41	1,0-105 лет	—	4,0	—	—	—
42	0,647	—	0,680 (70)	1,2(2)	—	—
43	0,135	—	6,2 (6)	—	—	—
44	2,09	—	0,88 (5)	—	—	—
45	165 сут		15,0	—	—	—
46	0,0035	—	0,74 (7)	—	—	—
48	0,187		1,09 (14)			
Sc	45 100	0,03349	27,2 (2)	22,4 (4)	18 Л (3)	4,Г(4)
Ti		0.05670	6,09 (13)		1,34(2)	2,75 (4)
46	8 , Г	—		2,78 (24)		
47	7,4			3,1 (2)	i ,3 (2)	1,8(3)
48	73,7		7,84 (25)	4,1 (2)		—
49	5,4		2,2 (3)	0.7 (3)	0,08 (4)	—
50	5,2		0,179 (3)	3,7 (3)	—	—
V		и,07050	5,08 (4)	4,8 (1)	0.017 (1)	—
50	0,25		60 (40)	7,5(1 0)	—	—
51	99,75			4.8 (2)		
Cr		0.0801	3!07^(8)	3.38 (1)	1,63(1)	1.75 (1)
50	4,35		15,9 (2)	—	2,41 (6)	—
52	83,79	-	0,76 (6)	2,96 (2)		
53	9,50		18,2 (1.5)	7,78 (20)	2,10 (3)	5,68 (19)
54	2,36		0.36 (4)	2.54 (10)	—	—
Мп	55 100	0,081-^5	13.3 (2)	2,2 (2)	1,65(2)	0,6 (2)
Fe		0,08487	2,56 (3)	11,35 (3)		0,38 (3)
54	5,8		2.25 (18)	2,17 (10)	—	—
56	91,72	—	2,59 (14)	12,46 (49)	—	—
57	2.2	—	2,48 (30)	-	-	—
58	0,28		1.28 (5)	—	—	—
Co	100	0,0890	37,18 (6)	6,00 (6)	0,96 (3)	5,04 (8)
60	5,271 года		2.0 (2)	—	—	—
60т	10,5 мин	—	58,0 (8,0)	-	—	—
Ni		0,08980	*tfr*	17,8 (4)	13,0 (3)	4.8 (2)
58	68,27			25,3(4)	—	-
60	26,10		2.9 (2)	0,98 (7)	—	—
61	1,13		2.5 (8)	9,0 (1.0)	7.1 (1)	1,9 (3)
62	3,59		14,5 (3)	9,1 (4)	—	—
64	0,91		1.52 (3)	0,0014 (3)	—	-
65	2,52 ч	—	22,4 (2.0)			

Символ и массовое число	Содержание в естественной "/"гоо-^"""	Концентрация ядер р. W см-2		с,, 10-" м^	"s coh» 10-2»	°s ropcoh > 10-28 „1
Си		0,08493	3,78 (2)	7,78 (3)	**7,28(1)**	0,50 (4)
63	69,20		4,50 (2)	5,1 (2)	**5,1 (2)**	0,006 (1)
64	**12,70 ч**		<6000	–	–	–
65	**30,80**	—	2,17 (3)	14.1 (5)	13.7 (5}	0,36 (5)
66	5,10 мин		135 (10)	–	–	–
Zn		0,06572	1.11 (2)	4,08 (3)	4,00 (3)	0,075 (7)
64	48,6	—	0,76 (2)	3,9 (3)		
			0,015	–		
65	244,1 сут		250 (150)			
66	27,9	—	0,85 (20)	4,9 (3)	–	–
67	4,1	—	6,8 (8)	~		
			0,006			
68	18,8		0,072 (4) [««'"Zn]	5,4 (3)		
			1,0 (1)			
			<0,020-10-3 1".			
70	0.62	—	83,0 (5,0)-10-3 ['is-Znl	—	z	–
			8.7(5)-10-M"'"Zn]			
Ga	—	0,05105	2,90 (10)	6,50 (20)	–	–
69	60,1	–	1,68 (7)	–	–	–
71	39,9	–	4,71 (23)		–	–
Ge		0,04530	2,3 (2)	8,37 (6)	–	–
70	20,5		3,43 (20)	8,8 (8)	–	–
72	27,4		0,98 (9)	7,5 (7)	–	–
73	7.8		15(2)	–	–	–
74	36,5		0,51 (8)	6,1 (4)	–	–
76	7,8		0,15 (2)	–	–	–
As	75 100	0,04606		5,43 (3)	5,37 (2)	0,06 (1)
Se		0,0343	**iiV(2)**	8,56(1,0)	8.22 (10)	0,34 (10)
74	0,87	–	51,8 (1,2)	–	–	–
76	9,0	—	85 (7'		–	–
77	7,6		42 (4)	**8,43 (16)**	–	–
78	23,5		0,43 (2)	**8,40 (2)**	–	–
80	49,6		0,61 (45)	6,95 (6)	–	–
82	9,2	–	0,039 (3)	5,0 (2)	–	–
	1,4-102° лет		[70 с, ssmsg]			
			0,0052 (4)			
			[22,5 мин, wse]			
Br	–	0,02351		6,1 (2)	–	0,1 (4)
79	50,69	—				
81	49,31			—		—
Kr		2,67-10-6	25 (1)	7,50 (13)	–	–
78	0,356		**0,17 (2)**	–	–	–
			[50 с, ">'«Kr]			
80	2,27					
82	11,6		**28 (20)**	–	–	–
83	11,5		180 (30)	–	–	–
84	57,0		0,110 (15)	–	–	–
85	10,7 года		1,66 (2)	–	–	–
86	**17,30**		0,003 (2)	–	–	–
			[76 мин, "«-Krj			
Rb		0,01078	0,38 (4)	6,4 (2)	**6,25 (4)**	–
85	72,17	–	0,48 (1)	–	6,2 (1)	–
87	27,83	-	0,120 (30)	-	6,6(1)	—
	4,8.101® лет					
Sr		0,01746	1,28 (6)	10(1)	–	–
84	0,56		0,87 (7)	–	–	–
86	9,80		1,04 (7)	–	–	–
87	7,00		16(3)	–	–	–
88	82,60		**0,058 (4)**	–	–	–
89	50,5 дня		**0,42 (4)**	–	–	–
90	28,8 года		0,9 (5)			

Продолоюение табл. 42 13

Символ и массовое		Содержание в естественной смеси, %, или (и)	Концентрация ядер р. СМ."			•'scoh. 10-^ Ml	
		100	0,03733		7.67 (6)	-	0,13 (2;
	90	64,1 ч					
	91	58,5 сут		1,4 (3)			
Zr			0,03732	0,185 (3)	6,40 (4)	6,2 (2)	0,15 (3)
	90	51,50		0,011 (5)	5,3 (3)		
	91	11,20		1,24 (25)	10,7 (6)	10,0 (6)	0,7(1)
	92	17,10	—	0,220 (60)	—	—	
	93	1,5-108 лет			—	—	
	94	17,40		0,0499 (24)		—	—
	96	2,80		0,0229 (1)		—	—
Nb	93	100	0,05445	1,15(5)	0,37 (7)	6,32 (4)	6,20 (6). 10-3
	94	2 . W лет	—	14,9 (1,0)	—	—	—
				1^35 сут, - . N b]			
				и,и (I]			
				[87 ч, ssmNb]			
	95	35 сут		< 7 , 0	—	—	—
				[23,4 ч, seNb]			
Mo		—	0,06403	2,55 (5)	5,59 (4)	-	0,27 (12)
	92	14,80	—	0,019	—	—	—
	94	9,30		0,015	—	—	—
	95	15,90		14,0 (5)	—	—	—
	96	16,70		0,5 (2)	—	—	—
	97	9,60		2,1 (5)	—	—	—
	98	24,10		0,130 (6)	—	—	—
	100	9,60		0,199 (3)	—	—	—
Tc	99	2,14-10® лет		20 (1) [15,8 с, wo. Tc]	—	—	—
Ru			0,07270	2,56 (13)	6,5 (1)	—	—
	96	5,50		0,29 (2)	-	—	—
	98	1,86		< 8 , 0	—	—	—
	99	12,7		7,1 (1,0)	—	—	—
	100	12,6	—	5,0 (6)	—	-	—
	101	17,0	—	3.4 (9)	—	—	-
	102	31,6		1,21 (7)	—	—	—
	104	18,7		0,32 (2)	—	—	—
	105	4,44 ч		0,39 (6)	—	—•	—
	106	367 сут		0,146 (45)	—	—	—
Rh	103	100	0,07263	145 (2)	—	—	—
	104	42,3 с		40 (30)	—	—	—
	105	**35,4 ч**		11 ООО (3000)	—	—	—
				[29,8 с,			
				5000 (1000)			
				[130 мин, 106'^Rh]			
Pd			0,06906	6,9 (4)	4,2 (2)	-	0,091 (9>
	102	1,00		3.4 (3)		—	—
	104	11,00		0,6 (3)		—	—
	105	22,20		20 (3)	5(6)	—	—
	106	27,30		0.292 (29)	5,1 (6)	—	—
				[6,5-10" лет, Pd]			
				0,013 (2)			
				[213 с, lov^Pd]			
	107	6,5-10» лет	-	1.8 (2)	—	—	—
	108	26,70		8,3 (5)	—	-	—
				[13.5 ч, io9.Pd]			
				0,183 (33)			
				[4,7 мин, W9'«Pd1			
	110	11,80	—	0,190 (30)	—	—	—
				[23,4 мин, lu.Pd]			
				0,037 (6)			
				[5,5 ч, iii'^Pd]			
Ag			0,05857	63,3 (4)	5,08 (3)	—	0,55 (4>
	107	51,83		37,6 (1,2) [losm+^Agj	7,44 (9)	—	0,12 (3)
	109	48,17	—	91,0 (1.0) [ii""+fi-Ag]	2,55 (6)	—	0,32 (5>
	110m	249,9 сут		82(11)			

Продолйкение табл. 41.2

Символ и массовое	Содержание в естественной, смеси, %, или (и) Г,	Концентрация ядер р, 10" см-з	о$_{п}$, т , 10-2» „г	10-28 „г	-scoh.	"s noncoh'
Cd		0,04635	2520	5,6 (6)	–	-
106	1 25					
108		Z	1.1 (3)	—	z	
109	464^сут	—	700 (100)		—	
			0,05<«'			
ПО	12,50		11 (1)		–	
111	12,80		24(3)	5(1)	–	
112	24,10	–	2,2 (5)	7(1)	–	–
1ISg	12,20		20 600 (400)			
	9-10" лет					
(14	28,70		0,30 (2)	**6(1)**		
			(53,4 ч,			
			0,036 (7)			
			[44,8 сут, ii5'«Cd]			
116	**7,50**		0,050 (8)	–	–	–
			[2,40 ч, i"«-cd]			
			0,025 (10)			
			[3,4 ч, ""«Cd]			
In		0,03818	193,8 (1,5)	2,45 (20)	1,95 (10)	0.5(1)
113	4,3		12,0 (1,1)	3,75 (7)	–	0,000037
115	95,7		202 (2)	2,6 (1)	–	0,6 (1)
	5.1-1011 лет					
Sn		0,03703	0,626 (9)	4,909 (6)	4,887 (3)	0,022 (5)
112	1,01		0,30 (4)	–	-	–
			[21 мин, usmsn]			
			0,71 (10)			
			[115,1 сут, WSn]			
114	0,67	–	0,115 (30)	4,6 (5)	-	-
115	0,38	–	30(7)	–	–	–
116	14,80		0,140 (30)	–	4,26 (15)	–
117	7,75		2.3 (5)	–	5.2 (4)	–
118	24,3		0,220 (50)	4,26 (15)		–
119	8,6		2,2 (5)	–	4.55 (38)	-
120	32,4		0,140 (30)	**5,17 (16)**		
			[27,1 ч, wis-sn]			
			0,001 (1)			
			[55 лет, «imsn]			
122	4,56		0,180 (20)	—	—	—
			[40,1 мин, i23'«Sn]			
			0,001 (1)			
			[129 сут, ws^rsn]			
124	5,64		0,130 (5)	**4,41 (30)**	—	–
			[9,5 мин, Wii^Snl			
			0,004 (2)			
			[9,62 сут, ^^sSn]			
Sb		0,03076	5,1 (1)	4.2(1)	4,03 (2)	0.17 (12)
121	57,3		5,9 (2) [i^am+fiSb]			
123	42,7		4,1 (1) Sb]	–		
Te		0,02841	4,7(1)	–	3,74 (6)	0,2 (2)
120	0,091	–	2,0 (3) [l2l5- Te]	–	–	–
122	2,5	–	3,4 (5)	–	–	–
123	0,89	—	418 (30)	–	–	–
			0,046 (6)-10-^<"'			
124	4,60		6,8(1,3)	3,8 (4)	–	–
125	7,00		1,55 (16)		4(4)	–
126	18,70		1,04 (15)	–		–
128	31,70	–	0,215 (8)	–	–	–
130	34,50		0,02 (1)	—	–	–
	2-10^1 лет		[30 ч, wxmxe]			
			0,97 (6)1			
			[25 мин, lадTe]			
1	-	0,02340	894 (90) [13 сут. «6S-I]	-	-	-

Содержание в естественной смеси, %, или (и) ^,,,[22]	Концентрация 1дер р. Ю^^ см-				
13 дней		5960			
100		6.2 (2) [25 мин, «e^Ij		3,54 (3)	
1,6-10' лет					
		f9,2^lmh, i3omij			
		9(1)			
		[12,36 ч, isoffij			
12,36 ч		18 (3) [8,04 сут. lawji			
8,04 сут		80 (50) [2,28 ч, l32-Tll			
	2,68-10-^^	23.9(1.2) ^	4,30 (2)		
0,096		165 (20)			
17 ч		<o,oз(«-			
0,09		3,5 (8)			
36,41 сут		<0,01<"'			
1,92		<8,**0**			
26,4		21 (5)			
4,1		<26,0 [i3im+s-xel			
21,2		85 (10)			
26,9					
5,25 сут					
10.4		0.265 (20)			
9,10 ч		2,65 (И).1oe			
8,9		**0,26 (2)**			
100	0,00847	29 (1,5) [iMm+g-Cs,			**0,22**
2,062 года		140 (12) '			
3,0-108 лет		8,5(5) [13,1 сут, M6S-CS			
30,17 года		0 , Ш (33) (32,2 мин, '			
		Г 2 О)	3,42 (4)		
0,106		11,3 П ,0)			
0,101		6,5 (8)			
		[10,7 года, 133«-Bal			
		0,5			
		[38,9 ч,			
2,417		**2,0 (1,6)**			
6,592					
7,854					
11,23		5.1 (4)			
71,70		0,360 (36)			
82,9 мии		**6.2 (1,6)**			
12,79 сут		1.6(3)			
	0,02667	8,97 (5)	10,13 (22)	,64 (10)	1,49 (20)
0,089		57,2 (5,7)			
1,1-10" лет					
99,911		8,93 (4)	10,13 (22)	,64 (10)	1,49 (20)
40,3 ч		2,7 (3)			
	0,02966	0,63 (4)	4,7 (3)		
0,19		0,95 (25)			
		[34,4 ч, ит'исе]			
		6.3 (1,5)			
		[9,0 ч, WT'Ce]			
0,254		0,015 (5)			
		[56 с, Msmce,			
		I,1(3)			
		сут, Msfi-ce]			
137,2 сут					
88,50		0,57 (4)	2,83 (11)		
35,2 сут		29 (3)			
11,08		0,95 (5)	3,Г(2)		
33,0 ч		6,0 (7)			
284,9 сут		**1,0 (1)**			
100	0,02769	II,5 (3)	**2 M (6)**		
19,2 ч		20(3)			
13,58 сут		90 (10)			

Продолюоение табл. 42 13

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или <и)	Концентрация ядер р, 10-^ СН-'		Cg, ICr" см-	- s c o h . м-	"snoncoh 10-м м-
Nd	—	0,02914	50,5(2,0)	16,0 (1,0>		11 (2)
142	27,20				–	
143	12,20		згб^'по)			
			17,4 (1,6)-10-3(п.=с)			
144	23,80	–	3,6 (3)	**1,0 (2)**		
	2,1.101!^лет					
145	8,30		4,2 (2)			
			<0,1.10-3(n,tx)			
146	17,20		1.4 (1)			
			[11 сут, "'fi'Nd]			
147	И сут	–	440 (150)			
148	5,76		2,5 (2)	**4.0 (5)**		
			[1,73 ч, iw^Nd]			
150	5,64	–	1,2 (2)	**3,5 (5)**		
			[12.4 мин, ibi^Nd]			

Таблица 41.3. Сечения поглощения и рассеяния для нейтронов с энергией 0,0253 эВ (элементы с атомными номерами 61—89) [24]

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или (И) 122]	Концентрация ядер р, ЦЬ* СМ» [23]		og, 10-м м»	
Рш	5,53 года		8400 0680)		
147	2,6234 года				205 (7)
148от	41.3 сут		22 000 (2500)		
148	5,37 сут		2000 (1000)		
149	53,1 ч		1400 (300)		
151	28.4 ч		<700		
Sm		0,0311	5800 (100)		
144	3,30		0,7		
145	340 сут		~ ПО		
147	15,10		64 (5)	147)	75Тб)
	I,06-1011 лет				
148	II,30		2,7(6)		
	8-101Б лет				
149	13,90		41 ООО (2000)		
150	7,4		102 (5)		133 (8)
151	90 лет		15 000 (1800)		
152	26,60		206 (6)		
154	22,60		5,5 (1,1)		
Eu		0,0207	4600 (100)	8,0 (1,0)	
151	47,9		9200 (100)		
			9,0 (2,0)-10~®		
152	13 лет		2300 (1000)		
153	52,1		390 (30)	8,0 (2)	—
154	8,5 года		1500 (400)		
Gd		0,0305	49 000 (1000)		
152	0,2		1100 (100)	-	-
	1,1-10" лет		7 , 0 - " ' >		

		Содержание в естественной смеси, %, или (И) Г,,„ [22]					
		2,10		85 (12)			
		14,80		61 ООО (500)	60		
		20,6		1,5 (1,2)			
		15,7		254 (2).103	1011		
		24,80		**2,5 (5)**			
		21,80		0,77 (2)			
		3,7 млн		31 ООО (12ООО)			
		100	0,0316	25,5(1,1)	20(2)		
		72,1 сут		525 (100)			
			0,0317	930 (20)	100 (10)	(25)	
		0,057		33 (3)			
				<9.10-3 <«. »)			
		0, 10		43 (6)			
				<6-10-3*"'			
		2,3		**61 (6)**			
		19.0		585 (30)	**22(1)**		
				<3.10-5 («. «)			
		25,5		**180 (20)**	2,5 (8)		
		24,9		130 (10)	9.7 (4)	140(10)	
		28.1		<2.10-5 (п. 0)			
		2,33 q		2700 (75)	347 (30)		
				3900 (300)			
			0,0320	66.5 (3,3)	9.4 (2)		
				<2-10-5 ("•			
			0,0172	162 (8)	**11,0(8)**		
		0,14		19(2)			
				<11-10-3'"' »)	3.8 (2,0)		
		1,56		13,2			
				< 1,2-10-3 <«•	12,1 (7)		
		33,4		35(3)			
					19,1 (1,0)		
		22,9		670 (30)			
				<7.10-5 («.	7.9 (8)		
		27,1		1,95 (5)			
				<9.10-5 ***(п.*** «)	15,0 (8)		
		14,90		5,7 (2)			
		7,52 ч		280 (30)	15,0(8)		
			0,0331	103 (3)	12(2)		
				< 1.10-5(п, ***а)***			
		128,6 сут					
		1,92 года		TA			
				36.6 (2,0)	25,0 (8)		
168	0,135			3470 (100)			
				<4.10-3 (П. ***"i***			
170	3,1			**10(1)**			
				<4.10-5 (П.			
171	14,4			50(4)			
				<4.10-5 (".			
172	21,9			1,3(8)			
				<3-10-=^			
173	16,2			1-9 (2)			

продолжение табл. 42.2

символ и число	содержание в естественной смеси, %, И.™ (И) 7 - [2 2]	Концентрация ядер р. Ю°о СМ-» [23]	О п.7 · ю-"' м2	10-м М»	
174	31,60		65(5)	—	
176	12,7	-	2,4 (2)	—	-
Lu	—	0,0335	77 (3)	8,0 (2,0)	84,7 (5)
" 175	97,39	—	<6.10-=^ <«.	—	—
176	2,61 3,6.1010 лет	—	2100 (50) <2.10-2	—	—
Hi	—	0,0449	ЦЗ Ш,	8(2)	110(2)
174	0,16 2.10^6 лет	—	390 (90)	—	
176	5,2	—	38(6)	—	—
177	18,60	-	365 (20)	—	372 (23)
178	27,1	—	86(7)	—	91 (6)
179	13,7	—	45(5)	—	51 (6)
180	35,2	-	12,6(7)	-	-
Ta 180	0,0123	—	700 (200)	—	
181	99,9877	0,0553	10,3 (2,5). 10=^ f15,8MHH, lezmjaj 21,0(7) [115 сут,	6,2 (6)	**27,2 (2)**
182	115 сут	-	8200 (600)	—	-
W	—	0,0619	18,5 (5)	—	—
180	0,13	—	3,5 [121 сут, 1MW]	—	—
182	26,3	—	20,7 (5)	—	—
183	14,3	—	10,2 (3)	—	—
184	30,7	—	1,8 (2)	-	—
186	28,6	—	37,8 (1,5)	—	—
187	23,9 ч	-	64 (10)		-
Re	—	0,0950	88(4)	11.3(5)	—
185	37,40	—	112(3)	—	—
187	62,60 4.101» лет	—	74 (4)	—	—
188	16,9 ч	-	<2,0	—	—
Os	—	0,0734	15,3 (7)	—	—
184	0,018	—	3000 (150) <1.10-2 <«.	—	—
186	1,582 2.10W лет	—	< ыо-^	-	—
187	1,60	—	336 (17)	-	344 (12)
188	13,3		4,3 (1,0) <3-10-®		-
189	16,1		23 (4) <1.10-=		-
190	26,4	—	13,0 (3)	-	—
192	41,0	—	2,0 (1)	-	—
193	30,2 ч	—	1540 .		

		Содержание тественной смеси или (И) *Т*				
			0,0782	426 (4)	14 (2)	440 (4)
	191	37,30		924 (53)		
	192	74,20 сут		1100 (400)		
	193	62,7				
	193m	10,6 сут				
Pt			0,0661	10.0 (2)	11,2(1,0)	
	190	0,013		150 (150)		
		6,0-10" лет		<8-10-3 («. «)		
	192	0,78		< 14,0		
				<2-10-^		
	194	32,9		1,2(9)		
				<5.10-"<"•		
	195	33,8		27(2)		
	196	25,3				
	198	7,2				
	199	30,8 мин		15 (10)		
Au	197	100		98.85 (9)		
	198	2,695 сут		25 100 (370)		
	199	3,14 сут		30 (15)		
Hg						
	196	0,15		f s p ,		
				[23,8 ч, w""Hg]		
				3080 (200)		
				[64,1 ч. M^Hg]		
		10,0		1,9		
		16,8		2000 (1000)		
		23.1		**<60,0**		
		13.2		**<60,0**		
		29,8		4,9 (1)		
		6,90		0,43 (10)		
			0,0351	3,4 (5)	9,7 (4)	13,1 *(7)*
		29,5		11,0 (5)		
		3.77 года		**21,6 (2,0)**		
		70,5		0,10(3)		
				0,170 (2)	11,4(2)	**11,6(2)**
	204	1,42		0,661 (70)		
	206	24,1		30,5 (8). 10-^		
	207	22,1		709 (10)-10-3		
	208	52,30		487 (30). 10-е		
	210	22.3 года		0,5 (5)		
Bi	209	100		33 (4). 10-3		
	210m	3,5-10® лет		54 (5). 10-3		
Rn	220	55,6 с		**<0,2**		
	222	3,8235 сут		0,72 (7)		
Ra	223	11,435 сут		130 (20)		
				0,7 (3)<"'f)		
	224	3,64 сут		12,0 (5)		
	226	1600 лет		11,5 (1,5)		
				< 1.10-* <"•		
	228	5,76 года		36 (5)		
				<2.0<"'		
Ac	227	21.773 года		515 (35)		
				<2.10-3 (". f)		

Таблиц; 41.4. Сечения деления и захвата, рассеяния и полные сечения для нейтронов с энергией 0,0253 эВ и элементов с атомными номерами 90—100

		Содержание в естественной смеси, %, или (и) 7-1/2 [22]	Концентрация ю""тм-» [23]			с,. 10-^» м» [25]	
		18,718 сут				200 (20)	
		1,1931 года				<0,3	
		7340 лет				30,5(3,0)	84,5(6,7)
		8,0 - л е т		23,2(6)	13 (4) [!	<1,2 • 10-3	
		100	0.0299	7.40(8)	12,67 (S	39 (4) • 10-=	20,07(11)
		1,41 • 101" лет					
		22,3 мин		1500(100)		15(2)	
		24,10 сут		1,8(5) [24]		<0,01 [24]	
		17,7 сут				1500 (250) [24]	
		3,28 • 10* лет	0,0402	201 (20)		0.012 (6)	(4)
		1,31 сут		760(100)		700(100)	
		27,0 сут				<0,1	Й(3)
				Пу1	мИН, 234тра]		
	234m	1,175 мин				<500	
	234	6,75 ч				<5000	
и	230	20,8 сут				25 (10)	
	231	4,2 сут				400 (300)	
	232	72 года		73,1(1,5)	14,7	75,2 (4,7)	163 (10)
	233	1,592 • 10' лет	0,0484	45,5(7) [27]	8,2 (2,0)	529,1 (1.2) [27]	574,7(1,0) [27]
	234	0,0054		100,0(1,5)	12(4)	<0,65	112(4)
		2,45 • 10' лет					
	235	0,720	0,0479	98,3 (8) [27]	14,0(5) [27]	582,6 (1,1) [27]	694,9(1,1) [27]
		7,038 • W лет					
	236	2,342 • 10' лет		5.2 (3)			
	237	6,75 сут		380(100)		<0,35	411 (138) (abs)
	238	99,275	0,0473	2.71 (2)	3,90 (16)	5,3 • 10-e	11,60(16)
		4,468 • 10" лет					
	239	23,5 мин		22(5)		14(3)	
Np	234	4,4 сут				900(300) [24]	
	235	396 сут		1600(200) [24]			
				[22,5 Ч, 2збг^р]			
				184 (4) [24]			
				[1,29 • 10" лет,			
		1,29 • 108 лет				2500(150)	
		2,14 • W лет		169 (3)		0,019 (3)	
		2,117 сут				2070 (30)	
		2,35 сут		31 (6)		<1,0	
				[7,5 мин. ^«'"Np]			
				14(14)			
				[65 мин, 2WNp]			
		2,85 года				162 (30)	
		45,4 сут				2200 (400)	
		87,74 года		547 (20)	564 (20)	16.5(5)	588 (20)
		2,410 • 10^ лет		269,3 (2,2) [27]		741,7(2,0) [27]	1017,3(2,9) [27]
		6570 лет		287,0(1.4)		0,05(5)	291,1 (1,4)
		14.4 года		358.2 (5,1) [27]	11(1)	1011,1(6,2) [27]	1369,4(7,7) [27]
		3,76 • 106 лет	0,0492	18,5(4)	8.0(2)	<0,2	26,5 (5)
		4,956 ч				180(30)	
		8,1 • 10' лет		(O [24]			
		10.5 ч		150(30) [24]			
		433 года		0,10(5) • 10-3]22]		3,14(10)	
				[13 с,			
				83,6(2,6)			
				[152 года,			
				752 (20)			
				[16,01 года.			
				835,6 (20)			
		152 года		1100(1100)		6900(400)	8000 (800)<®">

Продолюение табл. 42 13

Символ и	Содержание в естественной смеси, %, илн(и) Г„/2 [22]	Концентрация	10-26 „г [25]	tig, 10-2" „г [241	10-« Г25]	°tOt' [24]
243	7370 лет	—	79,0(4,0) 75,2(1,8) [26 мин. 244тД1JI] 4,1 (2) [10,1 ч,	—	**0,20(11)**	**85(4)**
244т	26 мин	–		–	1600(300)	–
244	10,1 ч	–	–	-	2300 (300)	–
Cm 242	162,8	—	20(10)	–	<5,0	—
243	28,5 года	–	**131 (10)**	–	609 (25)	825(125)'«bs)
244	18,11 года	–	**13,5(2,0)**	8(3)	1.0(2)	
245	8,5 • 10^ лет	–	350 (30)		2030 (60)	**2375 000)**
246	4,70 • № лет	–	1,3(3)	–	0J15(7)	–
247	1,60 • 10' лет	–	59,6	–		–
248	3,5 • лет	–	2,9(3)	–	**0,37 (7)**	–
249	65 мин	–	1,6(8) [24]	–	–	—
Вк 249	321,4 сут	—	1800(100)	–		1300 (300)
250	3,22 ч	–		–	960(150)	–
Cf 249	351,0 ч	—	450(30)	—	1660 (50)	—
250	13,1 года	-	1750 (250)	–	<350,0	-
251	900 лет	-	2850 (290)	–	4800 (480)	7150 (350)
252	2,64 года	–	20,4(1,5)	–	32(4)	–
253	17,8 сут	–	12,0(2,0)	–	1100(220)	—
Es 253	20,47 сут		155 (20) [39,3 Ч, 254m£s] <3,0 **[276 сут, 264^Es]**			
254m	39,3 ч	—	**1,3 [39,3 ч,**	—	1840(80)	
254	276 сут	–	**40,0** [38,3 оут, 256ES]	–	2900(110)	-
255	38,3 сут	—	43 (10)	—	3400(170) [28]	—
Fm 254	3,24.4^	-	76 (76)	–	–	—
255	20,1 ч	–	26(3)^	-		
256	2,63 ч	-	**45 (45)**	–		
257	100,5 сут	-		-	2950(160) [24]	6100 (600)

ядра-мишени указано его содержание в естественной смеси, в случае радиоактивного — период полураспада. Для некоторых нуклидов указаны обе величины. В третьей колонке приведены концентрации ядер. В четвертой колонке приведены сечения ядерных реакций Оп*л.* , ***Оп.р*** И Pabs. Сечения ядерных реакций о„„а , ***Оп.р*** и Pabs отличаются от значений о „л , приводимых в этой колонке, тем, что сопровождаются описанием типа ядерной реакции Например, запись 70,5(1,9) или 940(4)<^[n6]> относится к сечениям ядерных реакций Pabs и ап.а соответственно. В некоторых случаях даны сечения образования изомерного состояния, для которого допаднительно в квадратных скобках приводится период полураспада или (и) идентификация состояния: ***m*** — ядро в метастабильном состоянии, ***g*** — ядро в основном состоянии. В пятой—седьмой колонках даны сечения рассеяния и его составные части о в соь и

ЯБ noncoh.

В табл. 41.3 и 41.4 в последней колонке приведены полное сечение взаимодействия и сечение деления соответственно.

41.6. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛНЫХ СЕЧЕНИЙ ОТ ЭНЕРГИИ

На рис. 41.4—41.32 представлены энергетические зависимости полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами'Н, fH, 5B, 6C, дBe, seFe, 49ln, 79AU, e2U с водородом в легкой воде и дейтерием в тяжелой воде [29]. Сплошная кривая на графиках соответствует непрерывной зависимости сечений и получена в результате оценки и обработки всей совокупности экспериментальных результатов, имеющихся на момент оценки, и данных, полученных из расчета по теоретическим моделям в тех энергетических областях, где экспериментальных данных нет. Приводимые на рисунках некоторые экспериментальные значения сечений служат лишь для иллюстрации степени отклонения от оцененных значений. Полный перечень экспериментальных данных представлен в [29]. На рис. 41.19 для железа в энергетической области от 0,1 до 3 МэВ дано качественное описание хода сечения ввиду наличия сложной резонансной структуры.

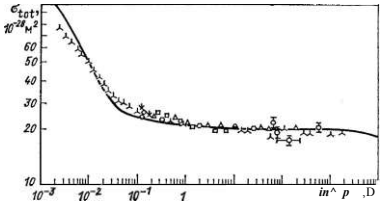


Рис. 41.4. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода от энергии нейтронов (10-^<Е'„<1СУ эВ) [29]

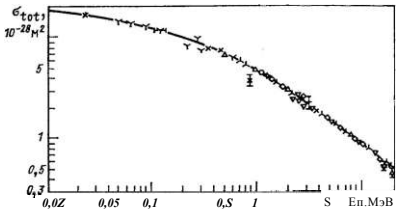


Рис. 41.5. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода от энергии нейтронов (2-10-2<Е„<20МэВ) [29]

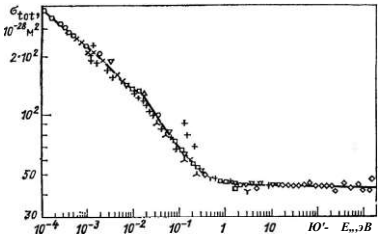
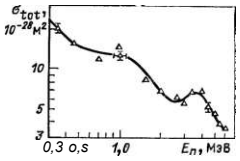


Рис. 41.6. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода в воде от энергии нейтронов (10-«<Е„<2-102 эВ) [29]



41.7. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода в воде от энергии нейтронов (0,3<Е„<7 МэВ) [29]

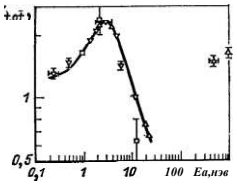


Рис. 41.8. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами трития от энергии нейтронов (0,2<<Е„<12 МэВ) [29]

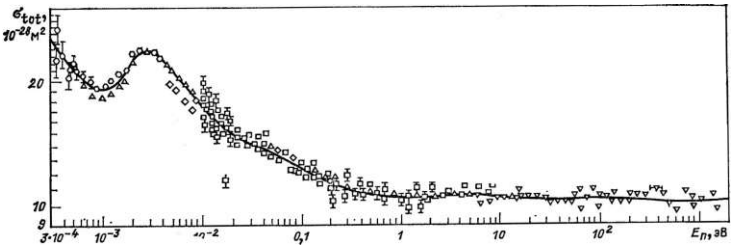


Рис. 41.9. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами дейтерия в тяжелой воде от энергии нейтронов (3-10-'<£„<2-1№ эВ) [291

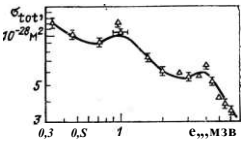


Рис. 41.10. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами дейтерия в тяжелой воде от энергии нейтронов (0,3<£'„<7 МэВ) [29]

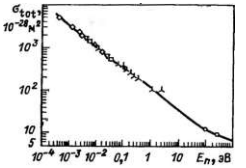


Рис. 41.11. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бора от энергии нейтронов (4-10~''<<£„<10^ i) [29]

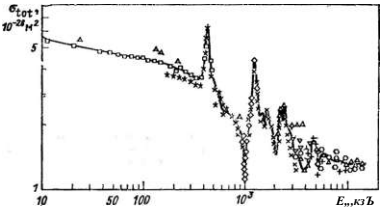


Рис. 41.12. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бора от энергии нейтронов (10<£'„<<2-10' кэВ) [29]

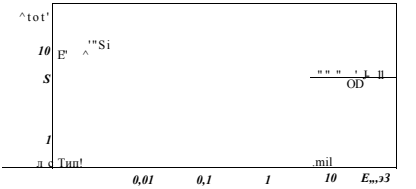


Рис. 41.13. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода от энергии нейтронов (4.10-2<£'„<100 эВ) [29]

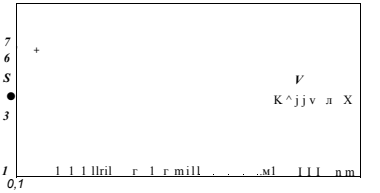


Рис. 41.14. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода от энергии нейтронов (0,1 кэВ<£„<1МэВ) [29]

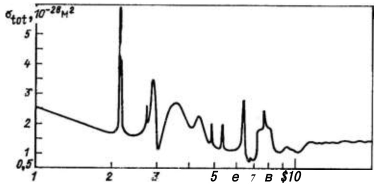


Рис. 41.15. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода от энергии нейтронов (1<£„<20 МэВ) [29]

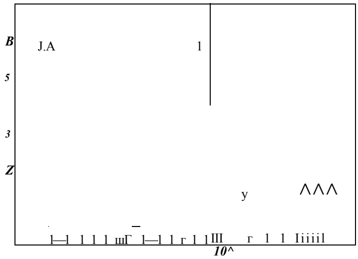
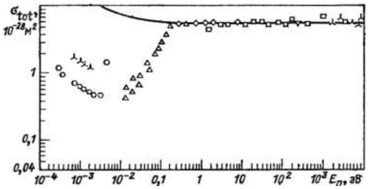


Рис. 41.17. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бериллия от энергии нейтронов (10 кэВ<£„<30 МэВ) [29]



. Зависимость полного сечения взаимодействия с ядрами бериллия от энергии нейтронов (10-=<£„<10^ эВ) [29]

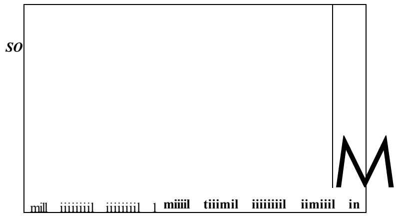


Рис. 41.18. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов (10-8<£„<5-10= эВ) [29]

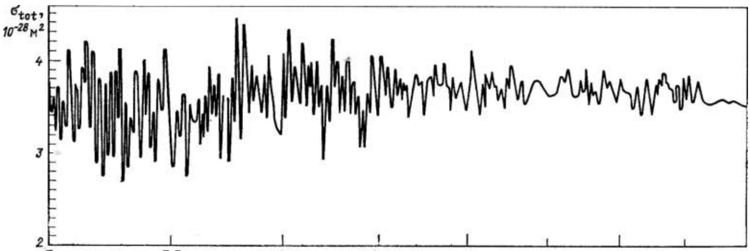


Рис. 41.19. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов (3<£„ <7 МэВ) [29]

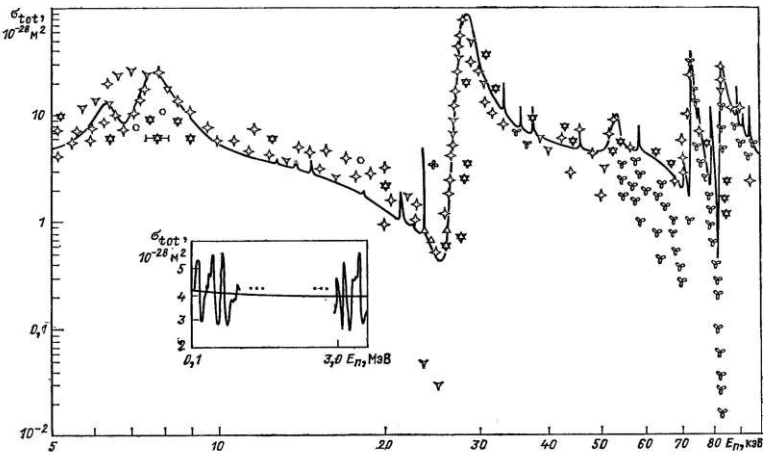


Рис. 41.20. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов (5 кэВ< <£n<3 МэВ) [29]

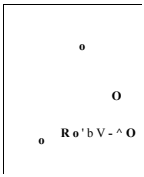


Рис. 41. 21. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов (7<£„<20 МЭВ) [29]

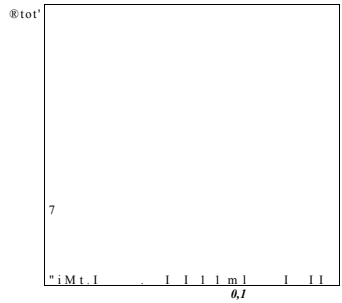


Рис. 41.22. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами индия от энергии нейтронов (5-10-'<£„<0,5 эВ) [29]

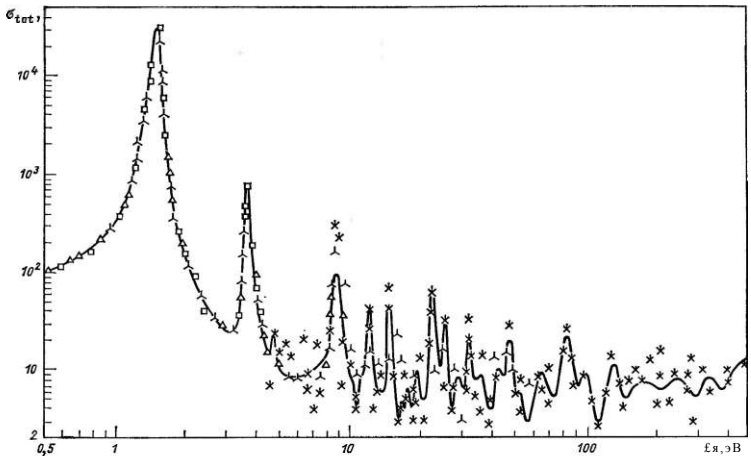


Рис. 41.23. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами индия от энергии нейтронов (0,5< <£«<500 эВ) 129]

^tot'

≙кш]—I \ I mill—I I mini—i i mini—i i i iiiil
0,5 1 10 10^ 10^

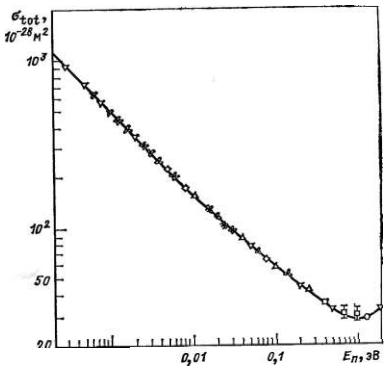


Рис. 41.24. Зависимость полного сечения взаимодействия нсйтронов с ядрами индия от энергии нейтронов (0,5 кэВ<£„<30 МэВ) [29]

Рис. 41.25. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов (10-«<£„<2 эВ (291

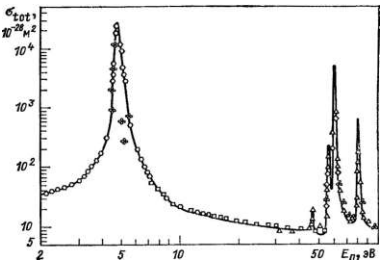


Рис. 41.26. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов ($2 < E_n < 100$ эВ) [29]

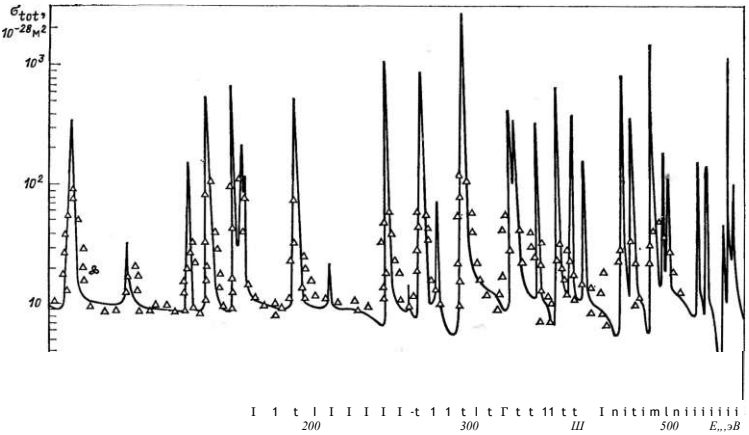


Рис. 41.27. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов ($100 < E_n < 600$ эВ) [29]

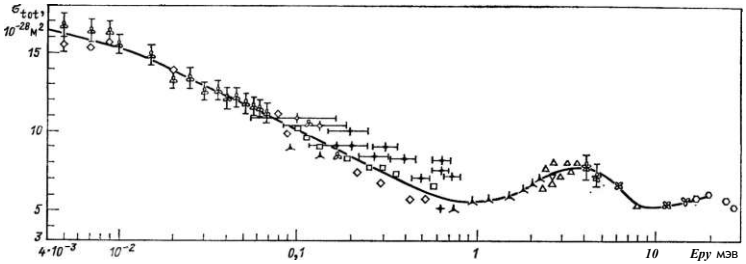


Рис. 41.28. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов (4 кэВ $<E_n<30$ МэВ) Г29]

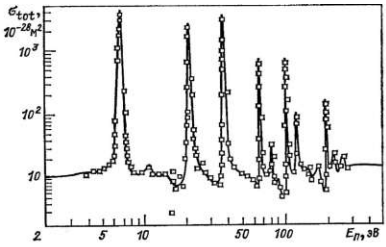


Рис. 41.30. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов ($2<E_n<500$ эВ) [29]

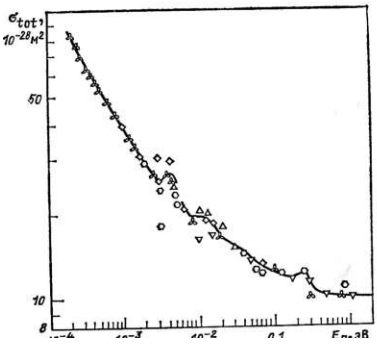


Рис. 41.29. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов ($10^{-1}<E_n<2$ эВ) [291

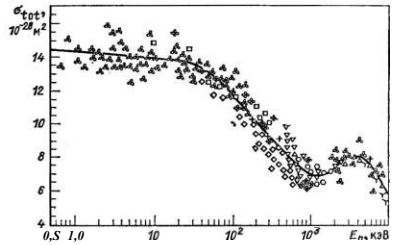


Рис. 41.31. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов (0,5 кэВ$<E_n<10$ МэВ) [29]

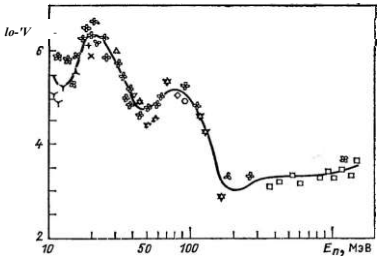


Рис. 41.32. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов (10<Е„<103 МэВ) [29]

41.7. РЕЗОНАНСНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ

Резонансным интегралом называется величина

$$I_i = \int_{(E)} \frac{dE}{E} \sigma_i(E).$$

где I_i — в 10-^® M^; fmm и £max — нижняя и верхняя границы энергетического спектра, значения которых зависят от условий эксперимента, эВ; i — индекс соответствующего процесса (I=Y означает радиационный захват, i={—деление и т. д.); о,-(£)—энергетическая зависимость сечения i-го процесса. Вклад высокоэнергетической области $\sigma_i(E)$ в резонансный интеграл, как правило, незначителен, поэтому полагают £tax—

Когда известно аналитическое выражение энергетической зависимости сечения ядерной реакции, значение резонансного интеграла может быть вычислено. К основным методам определения резонансных интегралов относятся измерения в поле нейтронов, сформированном из теплового максвелловского спектра с соответствующей температурой T, К, и эпитеплового 1/f-спектра с нижней границей (хАГ, где зависит от типа ядерного реактора; k — постоянная Больцмана, эВ/К. Для тяжеловодного реактора для графитового так что при 7'=293,6 К [ikT равно 0,126 и 0,076 эВ соответственно.

Величина

называется избыточным резонансным интегралом, где $g(T)$ — фактор Весткотта или g-фактор, определяющий отклонение зависимости сечения о (•£)отзакона 1/ E; £o=0,0253 эВ; Oo — значение сечения при Eo. С учетом того, что граница кадмиевого среза fed, эВ, выше значения iikT, интегрирование выполняется по двум энергетическим областям:

$$I \quad h \quad ' \quad - \int_{\hat{V}\text{-}ki} B(T)\, Co \quad f \; -$$

$$\int_{\hat{}cdL} = [Д/ - Д/ (IMj\text{-}i\text{-} [/ - / (l/T,)] = Д/' + /',$$

где /' — эпикадмиевый резонансный интеграл без части, зависящей от I/v; Д/' — часть, обрезаемая кадмиевым фильтром, которая зависит от температуры нейтронов и мала для тепловых энергий (табл. 41.5). Вклад члена Д/' следует учитывать для тех ядер, у которых резонансные пики расположены ниже Бы '^'Eu, '•'^Lu, ><2Та, 'S'lr, ифа, гзэрц „ др)

Данные по эпикадмиевым резонансным интегралам относятся к /' или /, которые включают часть, зависящую от I/v. Эта часть определяется из выражения

Таблица 41.5. Обозначения резонансных интегралов

Обозначение	Название	Пределы интегрироваввя	Примечания
/'	Эпикадмиевый избыточный резонансный интеграл		Метод кадмиевого фильтра
$I(\backslash Iv)$	Часть резонансного интеграла, зависящая от 1 'v		–
I	Эпикадмиевый резонансный интеграл, включающий часть, которая зависит от Xjv	$Ecd\text{-}oo$	/ =/' + /(1/y)
/1	Избыточный резонансный интеграл	(xfeT —o o	Метод без кадмиевого фильтра
Д/'	Избыточный резонансный интеграл в области $E < Eq^$	$V\text{-}kT\text{-}E^$	д/' = i\ — г

Таблица 42.16. Пробег R, мг/см^, ионов кислорода в различных веществах [1]

H	1		0,1489		0,5
	2	12,346 года	6,298-		0,5
He	3	–	2390 (10)		0,5
Li	6	–	28	Au (1558)	0,4
	7	.—	425,4		0,5
		844 МС	0,01756		0,5
Be	9	1,6 - 10" лет			0,5
B					0,5
	10	—	1722 (5)		0,5
	11	0,0203 с	0,0757		0,5
C		–	1,5 (2)-10-3		0,5
	12	–	1,5 (2)-10-3		0,5
N		-	0,90 (5)		0,5
	14	-	0,90 (5)		0,5
0		-	0,31 (4)-10-3		0,5
	16	–	0,27(3) • 10-3		0,5
F	19	11,0с	17,6 (3,0)-10-э		0,5
Na	**23**	0,02 с, 15,03 ч, 245-Na 24(m+g)Na			
			0,360(93)	Au (1558)	0,5
Wg		-	0,076 (20)	Au (1556)	/' = 0,045(2)
	24		0,030 (4)		0,5
Al	27	2,246 мин	0,175 (5)	Au (1551)	0,55
Si		–	0,5	Au (1558)	0,4
	28	–	0.078 (5)		0,5
P	31	14,3 сут	0,08(2)		0,5
s		–	**0,6**	Au (1558)	0,4
	32	–	1,672		0,5
Cl		–	12,8(1,7)	Li (32,2)	0,5
	35	3,5 • 105 лет	17(2)		0,5
AT			0,42 (5)		0,5
	40	1,83 ч	0,41 (3)		0,5
K		—	**1,0(1)**		0,5
	39		0,9(1		0,5
Ca			**0,20** (		0,5
		1,3 • 108 лет	0,18(i		
	40	18,7 с, «'"Sc			
Sc	45	84,0 сут, ««'So			0,5
	51		12(1)	Au (1560)	0,5
Ti		-	3,8(9)	Li (32,2)	0,5
	48		3,7(3)		0,5
V			2,7(1)		0,5
	51	3,75 мин	3,53(1,40)	Au (1558)	0,5
Cr			1,7(2)		0,5
	50	27,7 сут	12,5(3,24)	Au (1558)	0,5
	52	–	0,60 (5)		0,5
Mn	55	2,58 ч	15,6(5)	Au (1560)	0,5
Fe		—	1,4(2)		0,5
	56		1.4(2)		0,5
Co	59	10,5 мин, ««""Co	39,7(4,3)	Au (1551)	0,55
		5,272 года «"'Co	31.4(4,8)	Au (1551)	0,55
			71,1 (1,8)	Au (1551)	0,55
Ni			2.2(2)		0,5
	58	7,5 - 10« лет	**2,2 2)**		0,5
Cu					0,5
	63	12,7 ч		Au (1560)	0,5
Zn			2,3 (3)		0,5
	64	244 сут	1,73(8)	Au (1560)	0.5
Ga		–	18,7(1,5)		0,5
	69	21,1 мин	15,6(1.5)		0,5
Ge			6,rv1,0)		0,5
As	75	26,4 ч	75 (3)	Au (1560)	0,5

Продолоюение табл. 42 13

Символ и массовое число	Период полураспада продукта реакции		Стандарт	EQJ, ЭВ ИИ *V*
Se		9,6(1,2)	32,2	0,5
80	57,3 МИН, simse	0,50 (2)	Au, Co	0,55
	18 кин, SIS-Se	—	—	—
	81(M+g)se		–	0,5
Br		JO',!'		0,5
79	^42 ч, 8отвг	34,5(4,0)		0,5
	18 мин, sog-Br	92,0(10,0)	—	0,5
	80(M+G)BR	132,5(10)	—	0,5
KI			–	0,5
84	4,48 ч, 85ткг		—	/' = 6
	10,76 года,	2,01	—	/ 1 = 2
	85(m+g)K;r	2,7(7)	—	0,5
Rb		6,0(5)		0,5
85	*7,02* мин, semRb	1,16(3)	Au, Co	0,55
	18,7 сут, seg'Rb		—	—
	86(M+G)pjj	7,5(5)	—	0,5
SR	.—	11 (2)	—	0,5
	50,5 сут	0,05 (2)		0,5
y 89	3,19 ч, """"Y	0,88 (8)	Au, Co	0,55
	64,1 ч, ""S-y		—	—
	90(m+g)y	1,0(2)	–	0,5
Zr		**1,10(15)**		0,5
90		**0,20(3)**	—	0,5
Nb 93	6,2 мин,	6,56 0,96)	Au (1558)	0,5
	2,0 • 10« лет, WNb		—	—
	94(m+g)Nb			0,5
Mo				0,5
Tc 99	15,8 с	340 (20)		0,5
Ru		42 (4)	—	0,5
102.	39,35 сут	4,1(4)	—	0,5
Rh 103	4,4 мин, iM'^Rh	89 (7)	Au (1549)	
	42 с, io4S-Rh	1111(74)	Au (1549)	**/'= 1054^74)**
	104(αz + g)Rj,	1100 (50)	—	0,5
Pd	—	90(5)	—	0,5
106	21,3 с, i»""Pd		—	—
	6,5 - 10" лет, i»'S-pd			
	107(m+g)pjj	5,73 (57)	—	0,5
Ag		747 (20)	—	0,5
107	127 лет, wsmAg	1,26 (19)	Co (75)	Г = 3,0 (5)
	2,41 мин,			
	108(m + g)Ag		Au (1558)	/;=79{4)
109	250,4 сут, "0'"Ag	**71,7^3,6)**	Co (75)	/' = 15,5 (8)
	24,6 с, Ag	1112(68)	Au, Co	0,55
	110(m + g)Ag	1450 (40)	—	0,5
Cd	—	102 (2)	—	0,5
In	—	3200 (50)	–	0,5
115	2,2 с, iwmzjn	—	—	–
	54 мин, iw«ilN			
	14 с, iies^In	690 (45)	Au	1,3
	116(ml+m2)j^	**2114(23)**	Au, Co	0,55
	116(g+ml+m2)j^	**3300 (850)**	—	—
Sn		8,5 (2,0)		0,5
Sb	—	175 (10)	—	0,5
121	4,2 мин, i22msb	—	—	—
	2,7 сут, W2g-sb			
	122(m + g)sb	230 (10)	Au (1560)	0,5
Te		54 (3)		0,5
I 125		13 730 (2000)	—	0,5
127	24,99 мин	150 (3)	Au (1560)	0,5

Продолюение табл. 42 13

Символ и массовое число		Период полураспада продукта реакции		Стандарт	эВ или /
Xe	129		250 (25)		0,5
Cs	**133**	2,89 ч,	29, 2(6,2)	Ли (1550)	0,55
		2,05 года, ^«Cs	359 (90)	Au (1550)	0,55
			415(15)	—	0,5
Ba			7,5(1,0)		0,5
	138	83,3 мин	0,4 (2)	Au (1560)	0,5
La			19(1)	Au (1558)	0,5
	139	40,22 ч	12,5(4)	Au (1560)	0,5
Ce		—	3,0(8)	—	0,5
	140	32,5 сут	0,43 (2)	Au (1550)	0,55
Pr	141	19,2 ч	14,1 (2)	–	0,5
Nd		–	45 (5)	–	0,5
Pm	147	41,3 сут, wsmpjn	1026 (280)		0,5
		5,37 сут, wsS^Pm	1274 (66)	–	0,5
			3220	Au (1558)	—
Sm		–	1400 (20)	—	0,5
Eu		–	6320 (869)	Au (1551)	0,2
	153	8,5 года	3414 (197)	Au (1551)	0,55
Gd		–	390 (10)	—	0,5
Tb	159	72,1 сут	400 (24)	Au (1558)	/' = 390 (24)
Dy		–	1600(100)	—	0,5
Ho	165	1200 лет,			–
		27,2 ч, меедо	660 (30)	Au (1550)	0,5
			700 (20)	—	0,5
Er			740(10)		0,5
Tm		0,004 мс, «Tin			–
		130 сут, S-Tm			–
		<'"+g>Tm	1548 (56)	Au (1550)	0,55
Yb			182 (10)		0,5
Lu			900 (50)		0,5
	175	3,69 ч, "«"Lu	523 (57)	Au (1551)	0,55
Hf			**2000 (100)**		0,5
Ta	-		**720 (25)**	Au (1575)	**0,5**
	181	16,5 мин, iszm-j-g	**0,415(110)**	Au (1551)	**0,55**
		115,1 сут, imxa	717(58)	Au (1551)	**0,55**
		I82(m4-g)-i-a	717 (58)	Au (1551)	**0,55**
W		–	352 (30)	—	**0,5**
Os		—	209	Au (1558)	0,5
It		–	2250 (200)	—	0,5
	193	171 сут, iMmjr	—	—	
		19 ч, iMS-lr	1370 (150)		**0,5**
		194(/n+g))j.	1386 (ПО)	Au (1550)	**0,55**
Pt		—	140 (6)	—	0,5
Au	197	2,7 сут	1560 (40)	—	0,5
Hg		—	73 (10)	—	0,5
Tl		—	12(1)	—	0,5
	205	4,19 мин, 20бтт1	0,7 (2)	—	0,5
Pb		—	0,16(4)	—	0,5
	207	—	0,4 (2)	-	0,5
Bi	209	3,5-106 лет, ziomBi	—	—	—
		5,01 сут, aio^Bi	'—	—	-
		210(m + g)Bj	0,19(3)	—	0,5
Ra	226	41,2 мин	222 (15)	—	0,5
Ac	227	6,13 ч	1017 (103)	Co (70)	0,5

Таблица 42.16. Пробег R, мг/см^, ионов кислорода в различных веществах [1]

Символ и массовое число	Период полураспада	gf (300 К)	, 10-" м^	g, (300 К)	/р 10-м „2
Th 228	1,913 года		1000		
229	7300 лет	1,043	1000 (180)	1,025	464 (70)
230	80 ООО лет	1,013	1010 (30)		
232	1,4 • 10"" лет	0,995	85 (3)		0,619
233	22,3 мес		400 (100)		
Pa 231	32 760 лет	1,020	470 (100)	-	
233	27,0 сут	0,980	895 (30)		—
и 232	72 года	0,973	280(15)	0,976	350 (100)
233	159 200 лет	1,022	140 (6)		764 (13)
234	244 600 лет	0,989	645 (70)		
235	7,038 • 10» лет	0,981	144 (6)	0,980	
236	2,342-10' лет	1,002	365 (20)		^5(5)
237	6,75 сут				
238	4,468- 10» лет	1,002	ШГ		2,03
Np 237	2,14 • 10" лет	0,952	660 (50)	-	6,9
238	2,117 сут				880 (70)
Pu 236	2,85 года		197 [28J		960 [28]
238	87,74 года	0,956	162(15)	0,956	23(5)
239	24 ПО лет	1,131	190 (20)	1,065	310(10)
240	6553 года	1,028	8260 (250)		
241	14,7 года	1,04	162 (8)	1,046	570 (17)
242	3,76 • 105 лет	1,010	1280 (50)		4,7(4,7)
243	4,956 ч		265 (60)		540(140)
Am 241	432,6 года	0,994	1400 (90)	1,014	22(2)
241	432,6 года		1190 (80),(g)		
241	432,6 года		220 (15),(/и)		
242g	16,01 ч		300		
242m	141 год	Г!04	230 (100)	ь ю о	1900 (300)
243	7380 лет	1,013	2050(100)		10(6)
243	7380 лет		110(10),(g)		
243	7330 лет		1940 (100),(m)		
Cm 242	162,8 сут	0,927	150(40)		
243	28,5 года		215 (20)		1550 (200)
244	18,11 года	1,001	625 (50)	0,998	19(2)
245	8500 лет	0,936	104 (8)	0,942	790(40)
246	4700 лет	1,005	117(8)	1,006	
247	1,6 - 10' лет	1,002	500 (75)	0,995	
248	3,5 • 10= лет	1,002	265 (25)		
Bk 249	321,4 сут	-	1400 (700)	-	-
Cf 249	351 год		660 (120)		1900 (100)
250	13,1 года		8300 (4000)		
251	900 лет		1590 (70)		5400 (800)
252	2,84 года		43 <4)		110(20)
253	17,8 сут		12(2)		2000 (500)
Es 253	20,47 сут		7300 (400)		
253g	20,47 сут		4300 (220)		
253m	20,47 сут	Ё	3000 (180)	Ё	220« (100)
254	276 сут				
Fm 257	100,5 сут		5000 [28]		

в табл. 41.6 и 41.7 приведены значения резонансных интегралов; для некоторых элементов в пятой колонке даны дополнительные сведения о значении эпикадмиевого избыточного резонансного интеграла /'. Кроме того, для большинства элементов указаны эталонный образец и значение его резонансного интеграла, которые были использованы при обработке экспериментальных данных. Рекомендуются также данные [6, 21, 44].

41.8. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ (п, *2п)*

Реакция (п, 2п) относится к числу пороговых, и когда энергия нейтрона превышает на несколько мега-электрон-вольт значение пороговой энергии, эта реакция, как правило, протекает с большой вероятностью. Порог реакции (п, *2п)* равен приблизительно энергии связи нейтрона в ядре-мишени, поэтому она протекает только при взаимодействии с нейтронами энергией выше 8 МэВ. Исключение составляет реакция на бериллии, для которой порог ра.чен примерно 2 МэВ.

Значения сечений ядерной реакции *(n, 2n)* для различных нуклидов, усредненные по спектру нейтронов деления и энергетические зависимости сечения ядерной реакции («, 2«) для ^Be, ^Fe, ^чфЬ, ^з^ть, гз^и приведены в табл. 41.8 и на рис. 41.33—41.38.

Для оценки сечения ядерной реакции (и, 2п) в области энергий нейтронов приблизительно от 14 до 15 МэВ может быть использована следующая формула:

$$\sigma_{(n,\,2l)} = (1000\text{-}f7{,}5^{\wedge})f7{,}8\ \frac{^{\wedge}{}^{\wedge}{}^{\wedge}}{A} - 0{,}234\ \frac{N-Z}{(1000\text{-}Ь7{,}5Л)\ \ 0{,}65} < 0{,}13;$$

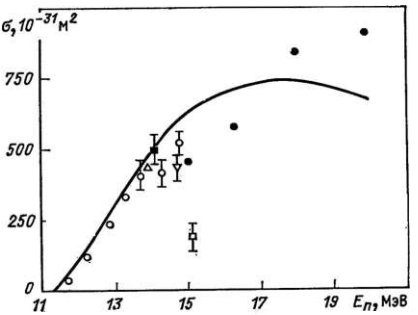
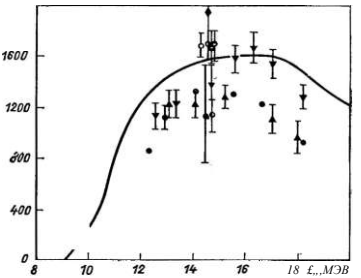


Рис. 41.34. Зависимость сечения ядерной реакции ^Te («, 2n)^=Fe от энергии нейтронов [30]



Рис, 41.35. Зависимость сечения ядерной реакции от энергии нейтронов [30]

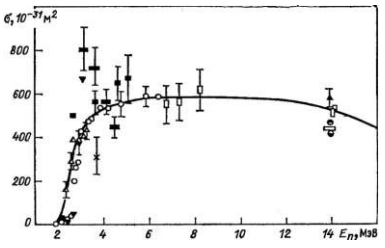


Рис. 41.33. Зависимость сечения ядерной реакции ®Be(rt, 2rt)®Be от энергии нейтронов [30]

где а(п. 2п) — в 10-3' л/ и Z — число нейтронов и протонов в ядре-мишени с массовым числом *А.* Расчетные значения согласуются с экспериментальными данными в пределах 10—15% для ядер с параметрами (Л'—Z)/Л>0,06. При (Л'—2)/У4<0,06 результаты вычислений существенно превышают экспериментальные сечения из-за того, что при выводе формулы не учитывалась конкурирующая реакция *(n, пр)* [30].

Таблица 42.16. Сечения реакций, вызываемых нейтронами с энергией около 14,5 МэВ и нейтронами спектра деления [30, 31]

Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергия реакции, МэВ	Сечение при E = 14.5 МэВ, 10^{-27}	Сечение, усредненно(по спектру деления $10^{-м}$ „2
(«. Р)	He-6	0,808 с	-2,73		4,18
(п, а)	H-3	12,34 года	4,78	I " >.! '	
(п, 2п)			—3,7	72(5)	0,158
(«, пр)			—4,65	170	–
(я, па)	H-2	Стабильное	— 1,47	400	–
(«, t)	He-4		4,785	10	–
(я. 2п)	Li-6	»	—7,25	22	0,37
(п, пр)	He-6	0,808 с	— 10	105	–
(я, па)	H-3	12,34 года	-2,47	340	–
(п, d)	He-6	0,808 с	—7,76	10	–
(п. О			-3,42	55	–
(я, Зп)			—12,92	0,2	–
(я, 2т)	H-2	Стабильное	-8,72	33	–
(п. Т)	Be-10	2,7 • 10" лет	6,81	0,001	–
(я, р) 131]	Li-9	0,175 с	—12,836	<4	10-3
{п, а)	He-6	0,808 с	-0,6022	10(1)	32,8(3,8)
(я. 2п)			— 1,665	524 (25)	144 (6)
(«. О	Li-7	Стабильное	—10,439	20	–
(я. 2п)			—8,4352	27	0,18
(я, О			0,2318	94 (20)	23,8
(я, яр)	Be-9	Стабильное	-6,59	75	–
(п. Р)	Be-11	13,57 с	—10,726	3,3(7)	10^
(я, ***а)***	Li-8	0,84 с	—6,633	30,5(3)	
(Я. 2п)	B-10	Стабильное	—11,456	19	0,008
(я, О	Be-9		—9,559	15	–
	B-12	0,02 с	— 12,588	0,19	0,26-10-3
	Be-9	Стабильное	—5,7016	80 (20)	0,37
(я, 2п)	C-11	20,38 мин	-18,723	0	4,2 (1,4)-10-'
(я, яа)			—7,37	190	–
(п. Р)	C-14	^30 лег	0,626	80(15)	–
(я. а)	B-11	Стабильное	-0,157	–	91
(п, 2п)	N-13	9,97 мин	— 10,554	7.3(1)	0,94 • 10-8
(я. d)	C-13	Стабильное	—5,326	49	–
(я, ***t)***	C-12	»	—4,015	29	–
(я, яр)	C-13	»	-7,55	46 (13)	
(я, 2а)	Li-7	»	—2,62	32	–
(п. Р)	N-16	7,11 с	—9,638	41 (3)	0,019(1)
(«, а)	C-13	Стабильное	-2,215	103 (20)	**11,3**
(п, 2п)	0-15	122 с	—15,669	0	**5,3(2,4) • 10-0**
(«, d)	N-15	Стабильное	—9,903	150	–
(я, яр)	N-15	»	—12,11	15	–
(я, ***d)*** [31]	0-18	»	—5,77	23	–
(П. Р)	0-19	26,9 с	-4,036	20 (2)	0,83 (2)
(П, а)	N-16	7,11 с	—1,523	33 (5)	15.'(2) ^^
(«, 2п)	F-18	109,8 мин	—10,431	57 (10)	7,3(7) • 10-3
(я, О	0-17	Стабильное	—7,557	10	–
(п, р)	F-20	11 с	-6,244	92	0,078
(я, а)	0-17	Стабильное	-0,588	14	12
(я, 2я)	Ne-19	17,22 с	-16,866	0	10-3
(я, т) [31]	Na-24	15 ч	6,96	0,24	–
(п. Р)	Ne-23	37,24 с	-3,596	44(4)	1.43 (2)
	F-20	11 с	-3,866	150 (10)	0,53 (2)
(я! 2^)	Na-22	2,6 года	-12,418	44 (4)	2,2(2) • 10-3
(я, пр)	Ne-22	Стабильное	-8,79	18	–
(П, Т) [31]	Mg-25		7,33	0,25 (£=4 МэВ)	
(п, Р)	Na-24	15 ч	—4,732	186 (15)	Г48 (82)
(п, а	Ne-21	Стабильное	—2,553	63	**1.8**
(я, 2п)	Mg-23	11,327 с	-16,531	0	**0,002**
(«, т) [31]	Al-28	2,24 мин	7,73	0,56	–
(я, Р)	Mg-27	9,46 мин	-1,828	, 74 (5)	3,86 (25)
(п, а)	Na-24	15 ч	-3,132	118(5)	0,705 (40)
(и, 2и)	A1-26	7,38 . 10® лет	-13,058	7	5 • 10-3

Продолоюение табл. 42 13

Ядро-мишеиь	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции		Сечение при £ = 14.5 МэВ, 10-м	Сечение, усредиеиио(
	(П. 2ft)	Al-26m	6,35 с		0	
	(п. ftp)	Mg-26	Стабильное	-8,27	50	
Si-28	((	Si-29		8,47		
	(я,	Al-28	2,243 мин	—3,860	**260 (25)**	6.4(8)
	((«)	Mg-25	Стабильное	-2,653	11	0,56
	n. 2ft)	Sl-27	4,11 с	-17,177	0	10-3
	(д. *tip)*	Al-27	Стабильное	-11,59	27	-
P-31	((T) f31]	P-32	14,3 сут	7,94	0,34	
	n, *P)*	Si-3I	2,62 ч	-0,709	83(5)	**35,5(2,7)**
	((*a)*	Al-28	2,243 мин	-1,944	110(10)	**1.9 (6)**
	((*2n)*	P-30	2,499 мин	-12,307	12,5(3)	1,09-10-3
	(п. *d)*	Si-30	Стабильное	-5,073	15	
	He)	Al-29	6,52 мин	-13,086	0,013	
	ftp)	Si-30	Стабильное	-^7,30	100	
S-32	((T)[311	Si-33	-	8,63	0,54	
	(д. P)	P-32	14,3 сут	-0,928	**230 (10)**	66,8(3,7)
	((«)	P-29	Стабильное	1,526	**68(10)**	43,6
	(II, 2ft)	P-31	2,61 с	-15,088	0	0,63-10-®
	(д. *t)*	P-30	2,499 мин	-12,689	0	1,06-10-5
	((	P-31	Стабильное	-8,86	78	
Cl-35	((	S-35	88 сут	0,615	110(10)	78 (23)
	(Ч. «)	P-32	14,3 сут	0,938	117(10>	8.8(4,6)
	(п. 2ft)	Cl-34	1,525 с	-12.646	9(1)	0,79 - 10-3
	(п. 2ft)	Cl-34m	32,06 мин	—	6(1)	0,51 - 10-3
Ar-40	((*P)*	Cl-40	1,32 мин	-6,72	18	0,01
	t «)	S-37	5,06 мин	—2,486	11.3(2)	0,11
	tn. 2ft)	Ar-39	269 лет	-9,871	570	0,15
	пр)	Cl-39	56,2 мин	—12,51	1.7	
K-39	((. *P)*	Ar-39	269 лет	0,217	179 (60)	82,2
	(д.	Cl-36	3,01-10^ лет	1,363	115(30)	8,0(3)
	((*t*	K-38	7,71 мин	-13,085	4(1)	0,37-10-3
	(ft. *2n)*	K-38m	0,9256 с			
	((*пр)*	Ar-38	Стабильное	—6,38		
	(п. *па)*	Cl-35	»	-7,22	30	
Ca-40	*P)*	K-40	1,28-10» лет	-0,529	470 (30)	77
	((«)	Ar-37	35,06 сут	1,748	320	13(6)
	2n)	Ca-39	0,86 с	—15,634	0	3 - 10-5
	(*t)*	K-38	7,71 мин	— 12,933	0.027	-
	(*пр)*		Стабильное	-8,33	200	
	па)	Ar-36	»	-7,04	23	-
Sc-45	(*P)*	Ca-45	163 сут	0,526	58(6)	15(12)
	((«)	K-42	12,36 ч	—0,395	55 (5)	0,182(12)
	((2я)	Sc-44	3,99 ч	-11,321	340(20)	0,04
	((2n)	Sc-44m	2,44 сут		116(15)	0,012
	((He)	K-43	22,6 ч	-11,341	0,0086	
	((2p)	K-44	22,15 мин	-9,65	0.21	
Ti-48	((*P)*	Sc-48	43,8 ч	-3,208	66(5)	0,3(18)
	((*a)*	Ca-45	163 сут	—2,033	31 (8)	0,013(6)
	(п. *2n)*	Ti-47	Стабильное	— 11,628	550	0,016
	(*пр)*	Sc-47	3,4 сут	-11.45	10	0.0013
V-51	*P)*	Ti-51	5,8 мин	-1,676	33 (3)	0,456 (23)
	((	Sc-48	43,8 ч	-2,055	16 (2)	0,022 (3)
	((2^)	V-50	Стабильное	-11,052	660 (50)	0.21
	по)	Ti-47	»	-10,29	2	0.000087
Cr-52	(d *P)*	V-52	3,76 мин	—3,196	**102 (20)**	1.09(8)
	(ft. *o)*	Ti-49	Стабильное	-1,211	**40 (4)**	0.083
	(ft 2ft)	Cr-51	27,7 сут	-12,041	357 (30)	0,033
	(ft. *пр)*	V-51	Стабильное	—10,5	30	0,005
Mn-55	(ft. *P)*	Cr-55	3,55 мин	•^1,806	45 (10)	1.2
	ft «)	V-52	3,76 мин	—0,626	29 (2)	0.11 (3)
	ft 2n)	Mn-54	312,3 сут	-10,224	809 (35)	0,244(15)
	ft, He)	V-53	1,55 мин	—12,709	0.8 (3)	

ядро-мишень	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энерги^^акции,	Сечение при £•=14,5 МэВ,	Сечение, усредненное по спектру деления Ю-й
Fe-56	(д *р)*	Mn-56	2,579 ч	-2,918	110(10)	1,03(75)
	((, ц)	Cr-53	Стабильное	0,321	40	0,397(12)
	(п. 2п)	Fe-55	2,72 года	—11,203		0,0754
	((, *t)*	Mn-54	312,3 сут	—11,931		–
	((, *пр)*	Mn-55	Стабильное	-10,19	35	0,0051
Co-59	(П. *р)*	Fe-59	45,1 сут	-0,783	60 (10)	1,42(14)
	(п. а)	Mn-56	2,579 ч	0,320	29(2)	0,143(10)
	((, 2/7)	Co-58	70,78 сут	— 10,46	707 (70)	0,40(4)
	((, *2п)*	Co-58m	9,15 ч	–	380	–
	((, He)	Mn-57	1,61 мин	-11,47	0,0046	–
Ni-58	((, *Р)*	Co.58	70,78 сут	0,395	374 (30)	108,5(5,4)
	((, *Р)*	Co-58m	9,15 ч	—	200	35,4 (2,2)
	(п.	Fe-55	2,72 года	2,89	**120 (15)**	3,0 (9)
	(п. 2п)	Ni-57	36,16 ч	— 12,203	**30 (3)**	5,77(31)-10-3
	((, *t)*	Co-56	78,76 сут	— 11,073	0,092	–
	((, *пр)*	Co-57	270,9 сут	—8,18	400	0,21
	((, *па)*	Fe-54	Стабильное	-6,39	30	0,0014
Cu-63	(п. *Р)*	Ni-63	100,1 года	0,716	120 (30)	9,8
	((, а)	Co-60	5,27 года	1,715	35(8)	0,50(56)
	((, а)	Co-60m	10,47 мин	–	25	–
	((, *2п)*	Cu-62	9,74 мин	— 10,854	551 (30)	0,12(12)
	((, He)	Co-61	1,65 ч	-9,528	0,113(4)	–
Zn-64	((, *Р)*	Cu-64	12,71 ч	0,208	176 (20)	29,9(1,6)
	((, *а)*	Ni-61	Стабильное	3,867	57,5	1,1
	((, *2п)*	Zn-63	38,1 мин	-11,856	178 (15)	0,017
	((. *t)*	Cu-62	9,74 мин	—10,08	0,086(23)	–
Ga-69	((, *Р)*	Zn-69	55,6 мин	—0,124	34(3)	1,5
	((, *Р)*	Zn-69m	14 ч	–	25 (2)	0,496 (73)
	((, *а)*	Cu-66	5,1 мин	2,584	18(2)	0,2
	(п. 2п)	Ga-68	68 мин	— 10,31	945 (50)	0,227
As-75	(п, *Р)*	Ge-75	82,78 мин	-0,406	19,2(2)	0,45(15)
	(п. *Р)*	Ge-75/л	48,3 с	•—	18	–
	(п.	Ga-72	14,1 ч	1,205	11,6(1)	7 Л • 10-3
	((, 2«)	As-74	17,78 сут	— 10,243	1061 (40)	0,33(2)
	((, **He)**	Ga-73	4,86 ч	-10,15	0,0035	–
Se-80	(п. *Р)*	As-80	16,5 с	—5,22	7,2	3,8 • 10-3
	(п, *а)*	Ge-77	11,3 ч	—0,95	2,6(4)	1.2 • 10-3
	((, *2п)*	Se-79	6,5 • 10^ лет	—9,896	1132(60)	0,432
	(п. 2п)	Se-79m	3,91 мин	–	90	–
Br-79	*(п. Р)*	Se-79	6,5 • 10^ лет	0,641	31	0,87
	(п, Р)	Se-79m	3,91 мин	–	10	–
	in. а)	As-76	26,32 ч	1,859	12,7(1,5)	0,031
	in. 2п)	Br-78	6,46 мин	— 10,693	974 (50)	0,204
Kr-84	*Р)*	Br-84	31,8 мин	—3,92	8(1,5)	9,3 • 10-3
	in. а)	Se-81	18,5 мин	-0,4		1,5 • 10-3
	2п)	Kr-83	Стабильное	— 10,518	**1290**	0,33
Rb-85	*in. Р)*	Kr-85	10,71 года	0,0955	18,3	0,26
	(п. Р)	Kr-85m	4,48 ч	–		–
	(п. ц)	Br-82	35,3 ч	0,991	**i f < „**	5,3 • 10-3
	(п. 2п)	Rb-84	32,77	—10,6	1123(100)	0,37(1)
	in. 2п)	Rb-84m	20,5 мин	–	350	–
Sr-88	*(п, Р)*	Rb-88	17,8 мин	—4.522	15(2)	3,8 • 10-3
	(п. ц)	Kr-85	10,71 года	—0,788	6	5,9 • 10-3
	(п, 2«)	Sr-87	Стабильное	— 11,113	1200	0,14
Y-89	*(п. 2п)*	Sr-87m	2,805 ч		318(30)	0,0451
	(п. Р)	Sr-89	50,55 сут	-0,707	24,6 (3)	0,31 (6)
	(п. о)	Rb-86	18,66 сут	0,699	5,4(1)	8,3 • 10-3
Zr-90	((, *Ш*	Y-88	107,15 сут	-11,468	966 (100)	0,156(11)
	Р)	Y-90	64,1 ч	— 1,506	45 (3)	0,38(2)
	((, *Р)*	Y-90m	3,19 ч	–	9,1	–
	((, а)	Sr-87	Стабильное	1,75	14	0,014
	((, ц)	Sr-87m	2,805 ч	–	4,1 (3)	–
	((, 2п)	Zr-89	78,43 ч	—11,983	768 (30)	0,076(1)

Продолжение табл. 42 13

Ядро-мишень	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергия реакции, МэВ	Сечение при $C = 14{,}5$ МэВ, 10-41 м2	Сечение, усредненное по спектру деления
	(«, 2n)	Zr-89m	4,18 МИН		86(8)	
	(n, t)	Y-88	**107,15 сут**	-11,352	0,041	
Nb-93	*(«, P)*	Zr-93	**1,53 • 10® лет**	0,719	35	1.0
	(П, a)	Y-90	64,1 ч	4,914	9,5(5)	0,0974 (68)
	{«, a)	Y-90m	3,19 ч	–	5	0.0267(17)
	(«, 2«)	Nb-92	1,2 -108 лет	-8,826	1375 (70)	1,04
	(n, 2n)	Nb-92m	10,13 сут	–	482 (35)	0,475(32)
	(«. He)	Y-91	58,51 сут	-7,719	0.0031	–
Mo-98	(«. p)	Nb-98	2,86 с	-3,82	11(4)	0,015
	(«, a)	Zr-95	64,05 сут	3,202	6,5(1)	0.014(2)
	(n, 2n)	Mo-97	Стабильное	—8,642	1370	1,3
Tc-99	(«. P)	Mo-99	66,02 ч		12(3)	0,10
	(п, *a)*	Nb-96	23,35 ч	–		0,065
	(n, 2n)	Tc-98	4,2-10« лет	–	**1230 (120)**	1,02
	(n, nd)	Nb-95	34,97 сут			
Ru-102	*(n, P)*	Tc-102	5,28 с	—3,72		0У012
	{n, P)	Tc-102m	4,35 мин	–	5,7	—.
	{n, a)	Mo-99	66,02 ч	2,502	5(1)	0,007
	(n, 2n)	Ru-101	Стабильное	-9,216	1390	0,802
Rh-103	*(n, p)*	Ru-103	39,35 сут	0,0198	16(1)	0,107(6)
	(П, a)	Tc-lOO	15,8 с	3,48	И 2)	0,016
	(n, 2n)	Rh-102	207 сут	-9.31	1325(100)	0,729
	{n, 2n)	Rh-102m	2,89 года	–	380	0,715
	(n. He)	Tc-101	14,2 мин	-8,55	0.016(7)	–
Pd-106	*(«, P)*	Rh-106	29,9 с	—2,758		0,04
	(«, P)	Rh-106m	132 мин	–		–
	{n, a)	Ru-103	39,35 сут	2,998	5,6(7)	7-10-3
	{n, 2n)	Pd-105	Стабильное	—9,561	1400	6,11 10-1
Ag-I07	*(n, p)*	Pd-I07	6,5-10® лет	0,747	41	0,47
	(«, P)	Pd-107m	21,3 с	–	15	–
	{n, a)	Rh-104	42,3 с	4,182	10.8	0,025
	(n, 2n)	Ag-106	23,96 мин	—9,551	1260 (120)	0,601
	(«, 2n)	Ag- *W6m*	8,41 сут	–	400	–
Cd-114	*(n, p)*	Ag-114	4,52 с	—4,22	5(2)	0,003
	(n, a)	Pd-111	22 мин	1,66	0,65(1)	5 • 10-4
	(n, a)	Pd-111m	5,5 ч	—	0,13	–
	{n, 2n)	Cd-113	Стабильное	-9,041	1500	1,07
	(n, 2n)	Cd-113m	13,6 года	–	860	–
In-115	*(«. P)*	Cd-115	53,46 ч	0,668	15(5)	0,041
	(«, P)	Cd-115m	44,6 сут	–	7	–
	(n, a)	Ag-U2	3,12 ч	2,68	2,5(5)	10-3
	(n, 2n)	In-114	71,9 с	-9,029	1710(80)	1,07
	(n, 2n)	In-ll4m	49,5 сут	–	1262 (100)	0,761
	(n. He)	Ag-113	5,37 ч	—9,34	0.007	–
Sn-120	*(n, p)*	In-120	3,08 ч	—4,82	4,3(7)	0,001
	(n, a)	Cd-117	2,4 ч	0,96	2,6	10-4
	(n, 2n)	Sn-119	Стабильное	-9,104	1560	1,03
Sb-121	*{n, p)*	Sn-121	27,06 ч	0,395	9,1	0,16
	(n, a)	In-l!8	5 с	3,51	3,6	4 • 10-^
	(n, 2n)	Sb-120	15,89 мин	—9,248	1580(100)	0,846
	(n, 2/7)	***Sb-mrn***	5,76 сут		610	–
Te-130	*(n, p)*	Sb-130	6,33 мин	—4,22	1,8 (3)	0,002
	("> P)	Sb-130/л	40,9 мин	–	0,6	•—
	(n, a)	Sn-127	2,1 ч	1,810	0,4(1)	2,0 • 10-«
	(n, 2n)	Te-129	69,6 мин	—8,413	1700(120)	1,80
	(n, 2n)	Te-129m	33,5 сут		1000	
	(n. He)	Sn-128	59,3 мин	-10,797	0,015(8)	–
M27	*(«, P)*	Te-127	9,35 ч	0,09	9(3)	0,068
	(«, P)	Te-127m	109 сут	.•	6(2)	0,013(1)
	(п *P)*	Te-127g	9,35 ч			0,009 (5)
	(«, a)	Sb-124	60,2 сут	4,279	1,4 (2)	0,003
	(n, 2n)	1-126	12,93 сут	—9,139	1496 (100)	1,05(65)

Ядро-мишень	Ядерная реакция	истаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергид реакции.	Сечение при E= 14,5 МэВ,	Сечение, усредненное по спектру деления
Xe-132	*in p)*	1-132	2,3 ч	—2,798	3,0(5)	0,012
	in α)	Te-129	69,6 мин	3,372	1,7	7 • 10-^
	in 2n)	Xe-131	Стабильное	-8,936	1670	1,068
	in 2n)	Xe-131m	11,9 сут		770	
Cs-133	*in- p)*	Xe-133	5,245 сут	0,355	**11,3(2)**	0,081
	in p)	Xe-133/n	2,191 сут	•—	**4,8(8)**	—
	in «)	1-130	12,36 ч	4,448	1,3 (г	0,0033 (8)
	{n	1-130/п	9 мин	—	0,54 (8)	–
	in. **a ,**	Cs-132	6,475 сут	-8,979	1603 (100)	0,992
	{n. d)	Xe-132	Стабильное	-3,87	0,9	—
	in. m	1-131	8,04 сут		0,0032	
Ba-138	*in. p)*	Cs-138	33,41 мин	—4,62	3,0 (5)	5 - 10-4
	{n. α)	Xe-135	9,083 ч	3,875	2,6(3)	0,0019(3)
	(n. α)	Xe-135т	15,65 мин	–	0,55	—
	in. 2n)	Ba-137	Стабильное	-8,612	1720	1,71
	(n. 2n)	Ba-137т	2,55 мин		1250	
La-139	*{n. p)*	Ba-139	84,9 мин	—1,478	4,8(4)	4 . 10-3
	in. α)	Cs-136	12,98 сут	4,817	1,8(3)	2 . 10-3
	in. 2n)	La-138	Стабильное	—8,778	1710	1,40
Ce-140	*{In, p)*	La-140	40,22 ч	-2,984	6,5(5)	5 - 10-3
	in.	Ba-137	Стабильное	5.338	11,5(1)	3 • 10-3
	2n)	Ce-139	139,3 сут	-9,203	1750 (70)	1,32
	in, 2n)	Ce-139m	56,2 с	—	963 (120)	•—
Pr-141	*in. P)*	Ce-141	32,5 сут	0,201	9(1)	0,035
	in. «)	La-138	Стабильное	6,146	3,2	7 . 10-5
	in. 2n)	Pr-140	3,39 мин	-9,397	1660 (200)	1,1
Nd-142	*{n. P)*	Pr-142	19,13 ч	-1,381	14(2)	0,042
	(«)	Ce-139	139,3 сут	6,642	7,1 (8)	0,01
	in. 2n)	Nd-141	2,42 ч	-9,813	1701 (120)	0,627
	in. 2n)	Nd-141/n	62,1 с	–	600 (50)	
Sm-152	*in, P)*	Pm-152	3,8 мин	-2,62	3,7(4)	5 - 10-3
	in. a)	Nd-149	1,73 ч	5,275	1,7(2)	8 • 10-4
	n. 2n)	Srn-151	90 лет	-8,267	1855(150)	2,34
Eu-153	*n. P)*	Sm-153	46,44 ч	-0,02	6(1)	0,015
	n. «)	Pm-150	2,68 ч	5,83	2,2(3)	10^
	{n. 2n)	Eu-152	13,2 года	-8,555	1950 (200)	2,15
	(*2n)*	Eu-152ml	9,3 ч	–	500(100)	–
	(n, 2n)	Eu-152/n2	96 мин	–	70	—
Gd-158	*{n. P)*	Eu-158	45,9 мин	-2,65	2,5	4 • 10-3
	in. a)	Sm-155	22,1 мин	5,16	1,4	3 . 10-4
	in, 2n)	Gd-157	Стабильное	-7,931	1900	3,76
Tb-159	*n. P)*	Gd-159	18,6 ч	—0,168	4,7 (7)	0,01
	n, a)	Eu-156	15,19 сут	6,215	1,8	8 . 10-4
	n. 2n)	Tb-158	150 лет	—8,136	1800 (120)	3,02
	n. 2n)	Tb-158m	10,5 с	—	450 (65)	—
Dy-164	*n. P)*	Tb-164	2,9 мин	-2,56	2.8(5)	3 . 10-3
	n. a)	Gd-161	3,6 мин	5,207	1,2	2 • 10-4
	n. 2n)	Dy-163	Стабильное	-7,655	1950	4,88
Ho-165	*n, P)*	Dy.165	2,334 ч	—0,513	3,2	4 • 10-3
	n. a)	Tb-162	7,7 мин	6,460	1,5	6 • 10-4
	{n. 2n)	Ho-164	29 мин	.7 J 989	2000 200)	3,49
	{n. 2n)	Ho-164m	37,5 мин		1200 200)	
Er-166	*{n. P)*	Ho-166	27 ч	-1,077	4,5(7)	0,022
	{n. a)	Dy-163	Стабильное	7,094	2	10-3
	n. 2n)	Er-165	10,36 ч	-8,474	1960 (150)	2,25
Tm-169	*n. P)*	Er-169	9,3 сут	0,431	4,6	0,014
	n. a)	Ho-166	27 ч	7,44	1,8	10-3
	n. 2n)	Tin-168	93,1 сут	—8,06	2071 (100)	3,43
Yb-174	*n, P)*	Tm-174	5,4 мин	—2,28	3,5(1,0)	3 • 10-3
	n. «)	Er-171	7,52 ч	6,414	1,2 2)	2 - 10-4
	n. 2n)	Yb-173	Стабильное	—7,469	2020	5,67
Lu-175	*n. P)*	Yb-175	4,19 сут	0,314	3.7(5)	8 • 10-3
	in. a)	Tm-172	63,6 ч	7,867	1,6	10-3

Продолжение табл. 42 13

Ядро-мишень	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергия реакции	Сечение при E = 14.5 МэВ. 10-« ы2	Сечение, усредненное по спектру деления
	(Я, ***2n)***	Lu-174	3,31 года	—7,659	2030 (200)	4,79
	(И, 2я)	Lu-174m	142 сут	–	630(50)	
Hf-180	⟨⟨, р)	Lu-180	5,7 мин	-2,52	1,9	10-3
	⟨⟨, а)	Yb-177	1,9 ч	6,856	1,1	2-10-4
	(n. 2я)	НМ79	Стабильное	—7,388	2080	6,88
	(n. 2я)	Hf-179m	18,68 с	–	600	–
Та-181	***•n. р)***	Hf-181	42,4 сут	—0,240	4.5(5)	1 • 10-3
	{n. а)	Lu-178	28,4 мин	7,41	1,4	3 • 10-^
	{n. 2п)	Та-180	10l3 лет	-7,644	2090 (100)	4,96
	(n. 2я)	Та-180/n	8,1 ч		1110(100)	–
	{n. Не)	Lu-179	4,59 ч	—6,56	0,0034	–
W-184	***(n.*** Р)	Та-184	8,7 ч	-2,248	4,0(1,0)	2 . 10-3
	(n. «)	Hf-181	42,4 сут	7,369	1,2(2)	2 (5) • 10-^
	(n. 2я)	W-183	Стабильное	—7,411	2100	6,55
	(n. 2я)	W-183m	5,15 с		1600	–
	(n, яр)	Та-183	5,1 сут	–	0,7 (2)	–
Re-187	***(n.*** Р)	W-187	23,9 ч	-0,529	4,3(5)	2-10-3
	{n. «)	Та-184	8,7 ч	7,102	1.2	1 - 10-^
	(n. 2я)	Re-186	90,64 ч	-7,371	1700 (200)	10(6)
	⟨⟨, Не)	Та-185	49 мин	-6,6	0,004 (3)	
Os-192	**(n,** Р)	Re-192	16 с	—3,19	1,3	3 - 10-^
	{n. «)	W-189	11,5 мин	5,24		1 . 10-4
	(n. 2«)	Os-191	15,4 сут	-7,559	2120 (150)	5,40
Ir-193	***(n,*** Р)	Os-193	31,5 ч	—0,350	3,8 (5)	1 -10-3
	(я. «)	Re-190	3,1 мин	6,64	1,1	1-10-4
	(я, 2«)	Ir-192	74,02 сут	—7,772	2048(150)	3,71
Pt-195	(П, ***р)***	Ir-195	2,5 ч	-0,153	2,0 (5)	2-10-3
	(n. а)	Os-192	Стабильное	8,711	1.1	4-10-4
	(я. ***2n)***	,Pt-194	Стабильное	—6,124	2190	18,5
Au-197	(п, ***Р)***	Pt-197	18,3 ч	0,036	2,1 (2)	2-10-3
	(я. «)	Ir-194	19,15 ч	6,979	0,35 (5)	1 -10-4
	(П, ***2n)***	Au-196	6,18 сут	—8,08	2254 (200)	3,0 (3)
	(n. 2n)	Au-196m	9,7 ч	–	230	
Hg-202	***(n. р)***	Au-202	29 с	—2,72	1,6	4-10-4
	(n. а)	Pt-199	31 мин	5,706	0,9	ЫО-4
	(n. 2n)	Hg-201	Стабильное	-7,756	2160	4,45
Tl-205	***Р)***	Hg-205	5,2 мин	-0,747	1,9(2)	5-10-4
	(n,	Au-202	29 с	5,68	0,85	1•10-4
	(n. 2я)	Tl-204	3,78 года	-7,541	2006 (200)	5,61
Pb-208	(я. Р)	Tl-208	3,07 мин	-4,211	1,0(5)	1-10-4
	(n. й)	Hg-205	5,2 мин	6,186	0,8	1-10-4
	(я, 2п)	Pb-207	Стабильное	-7,368	2300	6,18
	(я. ***2n)***	Pb-207m	0,8 с	–	1282	–
Bi-209	(я. Р)	Pb-209	3,31 ч	0,135	0,8(2)	1-10-3
	(я,	Tl-206	4,2 мин	9,634	0,8(3)	3-10-4
	(п. ***2n)***	Bi-208	3,68 • 105лет	-7,453	2261 (100)	5,92
Th-232	(я, т)	Th-233	22,2 мин	4,79	5,0	
[31]	(я. 2«)	Th-231	25,5 ч	—6,43	1160	
	(я, «)	Ra-229		8,08	4,6	
	(n. 3я)	Th-230	–	— 11,6	850	–
U-238	(я. ***7)***	U-239	23,5 мин	4,80	1	
[311	**(я.** 2я)	U-237	6,75 дня	—6,14	700—900	
	(п. Р)	Pa-238	–	—3,18	1,5	
	(я. ***t)***	Pa-236	12 мин	-5,10	0,02	–
	(П, ***а)***	Th-235	–	9,07	1,5	–
	(я. 3я)	U-236	2,39-10' лет	-11.27	500	–
	(я, ***пр)***	Pa-237	39 мин	-7,66	0,23	—

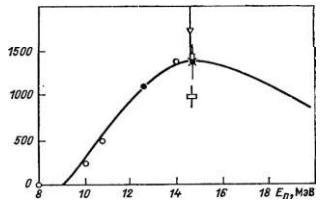


Рис. 41.36. Зависимость сечения ядерной реакции 2®8рЬ(и, от энергии нейтронов [30]

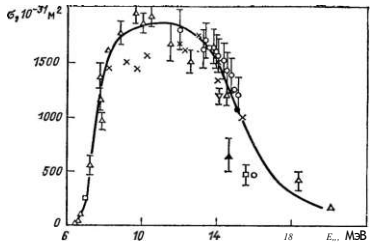


Рис. 41-37. Зависимость сечения ядерной реакции 2®2fh'(rt, 2n)2""тЬ от энергии нейтронов"

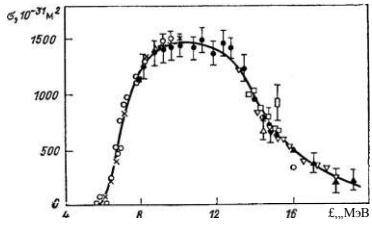


Рис. 41.38. Зависимость сечения ядерной реакции 2n)2"u от энергии нейтронов [30]

41.9. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ (n, *p)*

Д^я оценки сечения ядерной реакции (и, ***p)*** в области энергий нейтронов примерно от 14 до 15 МэВ можно воспользоваться формулой, которая дает результаты, согласующиеся в пределах, 25%-ной погрешности с экспериментальными данными для большинства ядер [30]:

$$\text{1) exp } \{0{,}083 \mid Л\,4\,x \quad (Z - 1)$$

$$X \qquad Ч \quad 0{,}58 \qquad -3{,}26$$

где а(„р) — в 10-^' м^.

41.10. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ («, а)

Предлагаемая формула для оценки сечения ядерной реакции с участием нейтронов энергией приблизительно от 14 до 15 МэВ дает результаты, согласующиеся с экспериментальными данными в пределах погрешности 40о/о[30, 31]:

$$V,\alpha) = 17{,}84 \exp[-33(A'-Z)M],$$

где а(„-,а)—в 10 м^.

41.11. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ (и, О

Для оценки сечения ядерной реакции ***(n. t)*** в области энергий нейтронов примерно от 14 до 15 МэВ предлагается формула, согласующаяся с экспериментальными данными в пределах 70%-ной погрешности:

$$= 4{,}52\ (Л'^{3} \qquad 1)\ \exp\ [-\ \backslash\ G\ (N-Z)\ I\ A\ ]\ ,$$

где о^п, г, — в 10-2'

41.12. АКТИВАЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Многие элементы имеют большое сечение активации и дают радиоактивные продукты с удобными для измерений периодами полураспада. Измерение спектров быстрых нейтронов активационным методом основано на применении, в качестве детекторов материалов, сечения которых отличаются от нуля лишь после определенной пороговой энергии. Подробно активационные методы спектрометрии нейтронов изложены в [32—36, 44].

Характеристики актнвационных и пороговых детекторов приведены в табл. 41.9, 41.10. Использованы следующие обозначения: 7",,-^температура нейтронов; тепловая, резонансная и быстрая — области энергии нейтронов; для. резонансной области в скобках указано значение пороговой энергии Enop", 'Yen — метод гамма-спектроскопии; Реп, 4яр, Y—Y и т. п. — методы измерения наведенной активности.

Характеристики детекторов, применяемых при спектрометрии на сборках с источником нейтронов на энергию 14 МэВ, представлены на рис. 41.39 и 41.40

Таблица 42.16. Пробег R, мг/см^, ионов кислорода в различных веществах [1]

Элемент; для пороговых детекторов элемент и тип реакции	Материал детектора	Т е « ™ а	Область применения	Толщина, 10"^ кг/м^	Плотность пото-ие(1Тр/(сы2)'	Метод изме-ности
Na	Таблетки (прес-сование)	1000	Резонансная (2950 эВ)	150-2000	10«-10^	Тсп> Реп
V	Фольга	1300	1/0	50	lOe-lOW	
G	Фольга	800	Резонансная, 1/с	10-400	1012_1018	*1сп*
Мп	Керамика	1300	Тепловая, резонансная (337 эВ)	3—1000	10«-10is	**Тсп> Реп**
	Сплав	650	–	–	–	–
	Полиэтилен	350	–	–	–	
Co	Фольга (электро-	900	Тепловая, резонансная (132 эВ)	0,5-700	1013—1018	Теп. Т - 7
	Сплав	650		—	—	—
	Полиэтилен	350				
Си	Фольга	800	Резонансная (580 эВ)	50-300	10»-10«	Теп. Реп
Ag	Сплав	650	Резонансная (5,2 эВ)	0,5—10	1012-1018	Теп
In	Фольга	400	Тепловая, резонансная (1,44 эВ)	0,5-10	10'—10"	**Теп. Реп**
	Сплав	650		–	–	
La	Керамика	1300	Резонансная (73.5 эВ)	5-200	101в—10'®	Тсп> Реп
	Сплав	650	–	–	–	
	Полютилен	350				
Sm	Керамика	1300	Резонансная (8,0 эВ)	1,0-20	101О-101S	Теп. Реп
	Сплав	650	–	–	–	
	Полиэтилен	350				
Eu	Керамика	1300	***Тп***	0,3-800	10»-1014	Теп» Реп
	Сплас	650	—i	–	–	
	Полиэтилен	350				
Dy	Керамика	1300	— гепловая, резонансная^	3-40	10»-1018	Теп» Реп
	Сплав с алюми-нием	650		—	–	—
	Полиэтилен	400				
Lu	Керамика	1300	Т^, тепловая	1,3-800	10"—1018	Теп» Реп
	Сплав	650	–	–	–	
	Полиэтилен	350				
W	Фольга (прокат. электролиз)	1300	Резонансная (18,8 эВ)	0,5-400	1010-1018	Теп> реп
	Сплав	650	–	–	–	–
	Полиэтилен	350	—	—	–	–
Au	Фольга (прокат)	900	Тепловая	0,5—600	108—101"	Теп»
	Сплав	650	–	–	–	
Mg ***(n, p)***	Фольга	650	Быстрая, > 7 МэВ	1,0-10	1012	Теп
Керамика		1300	–	–	–	
A1(n, p)	**Фольга**	800	Быстрая, > 4 МэВ	1,0-10	1013	Теп
	Керамика	1300	–	–	–	
S(n, p)	Таблетки (прес-сование)	400	Быстрая. 2 МэВ	10-30	10"	Рш
p)	Фольга (прессова-ние)	1200	Быстрая, > 3,7 МэВ	1—10	1012	Теп» Реп
Ni(n, p)	Фольга	1200	Быстрая, > 3 , 0 МэВ	1-10	1012	Теп
«6Cu(n, 2n)	Фольга	800	Быстрая, > 9,0 МэВ	1-10	1013	Теп. Реп
p)	Фольга	800	Быстрая, > 3 МэВ	1-10	1012	Теп
Rh(n, n[1])	Фольга	1300	Быстрая, > 0 , 8 МэВ	0,1-10	10"	
In(n, «[1])	Фольга	400	Быстрая, > 1 , 4 МэВ	0,1-10	10"	Теп
	Керамика	1300	–	–	–	
Er(n, Y)	Керамика	1300	***Тп***	0,5-40	10S-1018	Теп
	Полиэтилен	350	–	–	–	
7)	Фольга	1300	тепловая, резонанс-	3-100	1012—1018	Теп
	Сплав	650				

Таблица 42.16. Пробег R, мг/см^, ионов кислорода в различных веществах [1]

Тип ядерной реакции	^nop' [35]	Период полураспада продукта реакции	E^, МэВ	Выход γ-квантов на распад	МЭВ	
	0,1	56,1 мин	0,020	1,00	0,8	935 (45)
"Чп (n, «') НР'«1п	0,32	4,5 ч	0,333	0,46	1,15	985(10)
(n, 0	0,5				1,6	974 (6К)
O	1.0				1,6	143 (3№
«^Zn (n, p) «Си	0,96	12,78 ч	0,511	0,38	2,6	158 (8)
p) 3Ф	0,92	14,3 сут	= 1,71	1,0	2,6	232 (37)
®®№ (n, p) 58Co	1,0	71,3 сут	0,511	0,30	2,6	416(37)
p) мип	1,1	312,6 сут	0,835	1,0	3,0	398 (36)
p) 2'Mg	1,8	9,46 мин	0,84	0,70	4,5	51,3(4,5)
»aZr(«, p) 90Y	3,5	64,4 ч	= 2,27	1,0	6,2	15,8(1)
-Te(/2, p) 56Мп	2,9	2,58 ч	0,847	0,99	6,6	65,3(4,8)
•^Mg (n, p) ^Na	4,9	15,0 ч	1,369	1,0	7,2	143 (9)
(n, a) 56ЛП	5,0	2,58 ч	0,847	0,99	7,1	13,7(1,2)
(n, a) 24Na	4,8	15,0 ч	1,369	1,0	7,4	75,5(3,2)
(n, 2«)	6,5	25,64 ч	£ p = 0 , 3 0	1,0	7,6	1620(90)
e«Cu(n, 2n) e^Cu	10,0	12,78 ч	0,511	0,38	11,2	670 (100)
-mn (n, 2n) 54Mn	10,4	312,6 сут	0,835	1,0	11,7	540(120)
2n) i8F	11,0	109,8 мин	0,511	1,94	12,8	50 (8)
«3Cu (n, 2n) e^Cu	11,0	9,76 мин	0,511	1,95	12,9	620 (70)
(n, 2n) 5'Ni	12,5	36,0 ч	1,37		13,7	38,0(4,4)
««Zn (n, 2n) MZn	12,5	38,4 мин	1,15	0,'49	14,8	690 (40)

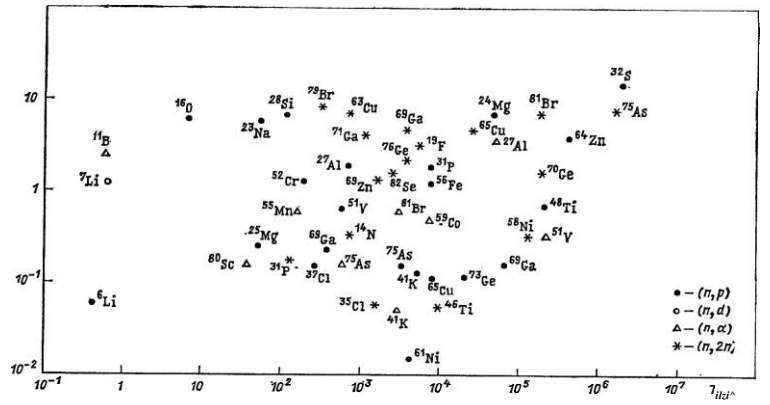


Рис. 41.39. Значения периода полураспада и величины ОПОР б/Л для пороговых ядерных реакций (1 < Лс 85) [43]: Опор "" сечение пороговой ядерной реакции при энергии нейтрона 14 МэВ, 10-31 м2; 6 — распространенность нуклида в относительных единицах

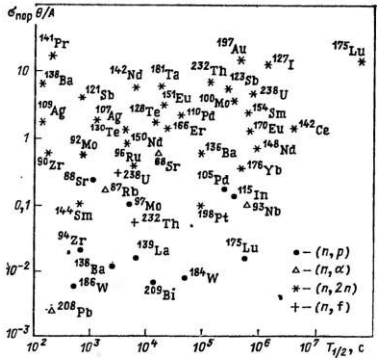


Рис. 41.40. Значения периода полураспада и величины Рпор 6/Л для пороговых ядерных реакций (86<Лс238) [43]. Обозначения те же, что на рис. 40.39

41.13. ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ

В элементарной теории замедления предполагается, что замедление нейтронов происходит исключительно в результате упругих соударений с ядрами среды. При таких соударениях нейтрон теряет часть своей энергии, которая переходит в кинетическую энергию ядра отдачи. После соударения энергия рассеянного нейтрона в ЛСК определяется из соотношения [38]

$$E/E' = (1/2)[1 + a + (1 - a)\cos\theta],$$

$$a = [(A-1)/(A+1)]^2,$$

где ***E' и E*** — энергия нейтрона до и после соударения; Л — масса ядра-мишени; 6 — угол рассеяния нейтрона

Угол рассеяния в ЛСК Ф (угол между векторами скоростей нейтрона до и после соударения) и угол рассеяния в СЦМ связаны соотношением

$$\cos\varphi = (1 + A\cos\theta)/\sqrt{1 + A^2 + 2A\cos\theta}$$

Здесь и выше масса нейтрона принята равной единице.

При упругих соударениях энергия нейтронов изменяется в пределах от ***aE'*** до E'.

Средняя логарифмическая потеря энергии на одно соударение с ядром массой ***A*** определяется как

$$\xi = (\ln E' - \ln E) = 1 + (A-1)^2/2A - [(A-1)/(A+1)]\ln$$

и не зависит от энергии. При Л > 1 справедлива формула

$$1/\xi = A/2 + 1/3 + 1/18A.$$

При Л=2 погрешность этой величины менее 1 % [37].

Среднее число соударений ***N,*** необходимое для того, чтобы нейтрон с начальной энергией ***E'*** замедлился до энергии ***E,*** определяется как

$$N = (1/\xi)\ln(E'/E).$$

В табл. 41.11 приведены значения среднего числа соударений, требующихся для замедления нейтрона от 2 МэВ до тепловой энергии (0,0253 эВ)<

Таблица 41.11. Свойства некоторых замедлителей [8]

Замедли-тель	Z—A	E	cos φ	*N*	*A*
H	1,00	1,00	0,67	18,2	1
?H	0,889	0,725	0.33	25,1	2
He	0,640	0,425	0,167	43	4
Li	0,438	0,268	0,095	68	7
Be	0,360	0,209	0,074	87	9
C	0,284	0,158	0,056	115	12
0	0,222	0,120	0,042	152	16
и	0,016	0,00838	0,0028	2172	238

Одной из величин, характеризующих меру распространения нейтронов в процессе замедления, является средний квадрат расстояния от источника, на котором нейтроны обладают энергией ***E.*** Средний квадрат перемещения при замедлении равен [38]

$$\Gamma^2 = \int \Gamma^2 W(\Gamma, E)\,dr = 2n\tau,$$

где *W(r,* т) — функция, определяющая нейтроиное поле, которое возникло в бесконечной однородной среде от точечного источника моноэнергетических нейтронов, и являющаяся решением уравнения $dW/r, \tau)/d\tau = \Delta\Pi 7(r,\tau)$ с начальным условием $W(r, 0) = 6(r)$; n=1, 2, 3 для источника в вид^ плоскости, нити и точки соответственно. Величину У т называют длиной замедления, а т — возрастом нейтронов. Значения т экспериментально измеряют по активации детектора на различных расстояниях от источника. Обычно определяют т с помощью детектора из "Пп, который имеет резонанс при E= = 1,46 эВ.

Добавка Дт, связанная с замедлением нейтронов от 1.46 эВ до ***Ee,*** мала по сравнению с т и может быть вычислена приближенно по формуле [38]:

$$\Delta\tau \approx \int_{E}^{1.46\ \text{эВ}} 3E\,\Sigma_s^2\,\mathrm{tr}\,\xi \cdot$$

где Str — транспортное макроскопическое сечение, оно заменяет полное сечение при расчетах в__^анспортном приближении: Str=2tot+Ss (1—соsф), соБф — средний косинус угла рассеяния в ЛСК.

Значение Дт, вычисленное по этой формуле, в той области, где необходимо учитывать влияние химических связей на процесс передачи энергии от нейтронов к ядрам замедлителя, меньше фактического. Возраст т, см^, для смеси легкого замедлителя с тяжелыми ядрами нельзя вычислять по приводимой формуле, поскольку в этом случае существенную роль играют неупругие столкновения и анизотропия рассеяния на тяжелых ядрах при больших энергиях.

Время замедления нейтрона до возраста т определяется как

$$\Gamma(\tau)$$

rjie Ts(u) = liv(u)Z4u) — среднее время между двумя соударениями нейтрона; dti/z — среднее число соударений на интервале замедления ***dii.*** Поскольку для ядер с массовыми числами Л>1 в области энергий до 100 кэВ l/i:tr = const, зависимость возраста нейтронов от энергии логарифмическая [13]:

: 2tr 3 5 Str

Iблица 41.12 Параметры, характеризующие свойства замедлителей [13]

Замедлитель	т. см^ [38]	Т, 10» с
н,о	26,48 (32)	1
D^O	111 (1)	5
С	282,5 (1,8)	15
Бе	86,6(2,4)	7
BeO	92,0(1,5)	7,8

41.13. Возраст нейтронов для некоторых замедлителей [39]

	т, см²	Источник нейтронов (E_n, МэВ)	Детектор
H2O	5,48 (15)	Sb-Y-Be (0,025)	
	13,9 (2)	Na-7-Be (0,970)	
	27,86 (1)	Со спектром деления	
	34.6 (2,2)	Реакция ***D (d,n)*** **(2,6)**	
	48,5	Ra-c	
	57,3 (2,0)	Po-a-Be	
	150,0 (6.0)	Реакция ***T(d,n)*** (14.1)	
	30,3 (1.5)	Со спектром деления	0,025
		Ra-a-Be	Dy
		Po-a-Be	0.025
50% H.O+50% A1	i . f	Со спектром деления	In
50% H20+50% Zr	81.7	То же	0,025
50% H20H-50% Pb	72.8	Ra-a-Be	} , „
50% H20+50% Fe	57.9	То же	0.025
50% H20+50% Zr	92	Po-a-Be	
D„0	109 (3)	Со спектром деления	In
	120	То же	0,025
		Sb-Y-Be (0,025)	
	142-147	Со спектром деления	
	312.5 (5)	Ra-a-Be	
(1,85)	3,2 (2)	Со спектром деления	
Be (1,78)	120 (23)	Ra-a-Be	
Be (1.84)	97,2	Со спектром деления	0,025
BeO (2,96)	93,4 (4,7)	То же	In
BeO	105 (10)		0,025

Для источника нейтронов с СосЮО кэВ время медления

$$\Gamma(\pounds) = \frac{J\ V\ (\pounds')\ E'}{?Ss\ \wedge\ f\ \ Yc}$$

Для малых энергий, т. е. £<£'0,

$$\frac{T(E)^2/v\{E)}{Ss.}$$

В табл. 41.12, 41.13 приведены значения вочраста нейтронов от источника со спектром деления при их згледеле11И11 до резонансной энергии In (1,46 э 3) и значения т для некоторых замедлителей.

41.14. ДИФФУЗИЯ НЕЙТРОНОВ

Длиной диффузии называется величина =F D/Ia, см, где ***D*** — коэффициент диффузии, см; 2а — макроскопическое сечение поглощения, см-'. Коэффициент Д!;ф-

Таблица 41.14. Время жизни тепловых нейтронов [9]

Замедлитель	Плотность, Г'СМ^	
H2O	1,00	2,13
	1,10	1300
C	1,6	129
Be	1,85	36,5
BeO	2,96	76,0
Парафин	0,87	1,78
Органическое стекло	1,18	2,32
ZrHj J.	3,48	2,66

Таблица 41.15. Диффузионные характеристики некоторых веществ [38]

Вещество		e [21]	L. см	D. cv
H2O	—	—	2,69 (2)	0.1423 (19)
D^O	—	—	147 (2)	0.84 (1)
Be	0,9259	0,209	24,4 (13)	0,487 (5)
BeO	—	—	36,5 (3)	0,627 (7)
C	0,9440	0,158	56,4 (6)	0,828 (8)
Na	0,9710	0,0845	17,7 1	3,755 (6)
Mg	0,9722	0,0811	30,4 (8)	2.229 (2)
A!	0,9754	0,0723	16,7 (1)	з . ^ 8 Р,
Ca [23]	0,9833	0,0492	21,8	
Cd [23]	0,9940	0,0178	0,0949	1,03
Мп [23]	0,9878	0,0359	1,30	1,80
Fe	0,9881	0,0353	1,22 (1)	0,288 (1)
	0,9887	0,0335	0,40	0,541
а ш !	0,9896	0,0309	1,30	0,552
Zr	0,9927	0,0218	13,1 (1)	1,195 (9)
Nb [23]	0,9928	0,0214	4,42	1,23
Mo [23]	0,9931	0,0207	2,08	0,749
AGL^A,	0,9938	0,0184	0,508	0,953
	0,9968	0,0096	13,3 (1)	0,875 (16)
Bi	0,9968	0,0095	39,20 (24)	1,263 (5)
Th	-	0,0086	1,78 (1)	0,601 (4)
и	-	0,0084	1,20 (1)	0,453 (4)
Pu [23]		0.0083	0,0708	0,286

фузии ***D,*** см. связан с диффузионной постоянной Do, см^/с, соотношением ***Do = Dv,*** где t) — скорость, см/с. Длина диффузии с точностью до числового множителя характеризует среднее расстояние между точкой рождения нейтрона и точкой, в которой он поглощается, т. е.

где г — расстояние по прямой от точки возникновения нейтрона до точки его захвата.

Величина U с, определяемая по формуле где f — скорость нейтрона, см/с, называется временем диффузии или временем жизни тепловых нейтронов (табл. 41.14),

Таблица 41.16. Время термализации в некоторых замедлителях [40]

Замедлитель	10-0 с
H^O (77 K)	55,5 (1,5)
HgO (300 K)	5,8 (0,6)
C	185 (45)
	28
BeO	67

Значения длины диффузии L, коэффициента диффузии ***D,*** средней логарифмической потери анергии g и величины 1 — г д е U, — средний косинус угла рассеяния, для ряда элементов приведены в табл. 41.15.

Время термализации ^tn (табл. 41.16) определяется как скорость приближения средней энергии нейтронов к равновесной, т. е.

$$E — (2/3)\ \kappa T = \text{const}\ \exp\ (— \mathit{tlh}^{\wedge}.$$

В экспериментах с импульсными источниками нейтронов постоянная спада асимптотической плотности потока нейтронов связана с диффузионными свойствами среды н геометрическим параметром S^, см^^ соотношением

$$Д, = \quad £)_{n}\ \& — CB'^{\wedge} + FB^{\wedge},$$

где О коэффициент диффузии, см; v — скорость нейтрона, см/с; '2а — макроскопическое сечение поглощения, СК-'; ***Do= Ov,*** см^/с; ***C*** — коэффициент диффузионного охлаждения, см^с; ***F*** —числовой коэффициент, CMVC.

Значения величин, характеризующих диффузионные свойства замедляющих нейтроны сред, приведены в табл. 41.17.

Таблица 41.17. Диффузионные параметры замедлителей [41]

Среда (удельная масса, г/см®)	B^ см-г	x_{tr}, с-1	t. см	CM2C	***C***, 10> см>/с 1F, CMVC]
HsO	**0,02-0,42**	-	**2,80 (3)**	**0,368 (4)**	**0,4137 (688)**
D,0				**1,96 (7)**	**3,72 (50)**
(1,70)	**1,76-18,9**	**74,7 (0,6)**	**53,8 (3)**		**340 (30)**
			52,4 (1.4) [42]	**iiose (L) [42]**	**390 (25) [42]**
(1,85)	**3,4-74**	**277 (8)**	**20,8 (3)**	**1,235 (13)**	
(1,79)			**21,8 (3) [42]**	**1,233 (7) [42]**	**31,3^(8) [42]**
BeO		**132 (3)**	**29,9 (3)**	**1,178 (3)**	**38,5 (8)**
s			**28,9 (5) [421**	**1,548 (9) [42]**	
Zr **[40]**		**3765 (89)**		**10,579 (32)**	
Бензо.'! **[40]**		2886 (111)		0,4865 (137)	**S ' i l ,**
Парафин		5860 70)	2,13'(4)	0,266 (5)	**0,120 (50)**
Полиэтилен		5900 90)	2,12 (3)	0,265 (6)	**0,260 (80)**
Даутерм А (дифенил — **26**,8%, оксидифенил — **73,2%)**		2870 40)	4,14 **(7)**	0,492 (6)	**1,19 (21)**
Органическое стекло		4300		0,34	
ZrH, 7	0,03—0,39			0,579 (32)	**21,2'(3,5)** **50 (14)**
Люсит		3757 (98)	**3,14 (3)**		
Дифенил ***(T = 7Г*** C)	0,0816-0,28		**4.82 (7)**	0,5437 (117)	**0,985 (55)**
«-Гептан (Г = 17,5° C)	0,11-1,5		**2,59 (6)**	0,3313 (12)	**0,480 (29)**
Моноизопропилбифенил **(T = 30** ^C)	0,0945-0,2952	4950 (120)		0,3780 (33)	**' 0,125 (43)**

СПР1С0К ЛР1ТЕРАТУРЫ

1. ENDF-102. Data Formates and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File, ENDF/Revised by D. Garber, C. Dunford, S. Pearlstein. BNL-NCS-50496. Upton, N. Y., 1975.

2. Hawerton R. J., Piechaty E. F., Cullen D. E. The LLL Evaluated Nuclear Data Library (ENDL): Evaluation Techniques, Graphical Displays and Descriptions of Individual Evaluations. UCRL-50400. Lawrence Livermore Laboratory. 1971. Vol 4.

3. Parker K. The Aldermaston Nuclear Data Library as at May 1963. AWRE 0-70/63. Atomic Weapons Research Establishments. Aldermasten, England, 1963.

4. Well D. Card Image Format of the Karlsruhe Evaluated Nuclear Data File KEDAK. Karlsruhe Report KFK

880. Institut fiir Angewandte Kernphysik Kernforschungszentrum. Karlsruhe, 1968.

5. CINDA 84 (1981—1984). The index to literature and computer files on microscopic neutron data. Published on behalf of USA National Nuclear Data Center, USSR Nuclear Data Centre, NEA Data Bank, IAEA Nuclear Data Section. Vienna. IAEA, 1984.

6. **Радиационный** захват нейтронов: Справочник/ /Т. С. Беланова, А. В. Игнатюк, А. Б. Пащенко, В. И. Пляскин. М.: Энергоатомиздат, 1986.

7. Блатт Дж., Вайсконф В. Теоретическая ядерная физика: **Пер. с англ.** М.: Изд-во иностр. **лит., 1954.**

8. **Кёртис Л.** Введение в нейтронную физику: Пер. **с** англ. М. Атомиздат, 1965.

9. **Бекурц К., Виртц К.** Нейтронная физика: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1968.

10. **Ситенко** А. Г. Теория ядерных реакций: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1983.

11. Александров Ю. А. Фундаментальные свойства нейтронов. — 2-е изд. М.: Энергоиздат, 1982.

12. **Вейнберг** А., **Вигнер** Е. Физическая теория ядерных реакторов: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит.,

13. Фейнберг С. М., Шихов С. Б., Троянский В. Б. Теория ядерных реакторов: Учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1980. Т. 1: Элементарная теория реакторов.

14. **Вычислительные методы в физике реакторов:** Сб. статей/Под ред. Х. Гринспена, К. Келбера, Д. Окрента: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1972.

15. Николаев М. Н., Базазянц Н. О. Анизотропия упругого рассеяния нейтронов. М.: Атомиздат, 1972.

16. Анципов Г. В., Коньшин В. А., Суховицкий Е. Ш. Ядерные константы для изотопов плутония. Минск: Наука и техника, **1982.**

17. **Обозначения,** единицы измерений и терминология в физике, документ UIP (1978)//Успехи физ. наук. 1979. Т. 129, вып. 2. С. 289—338.

18. **Partical** Data Group. Review of Particle Properties//Rev. Mo'd. Phys. 1984. Vol. 56, N 2. Pt II. P. S122—SI23.

19. **Neutron** Physics. Springer Tracts in Modern Physics. Bertin: Springer-Verlag, 1977. Vol. 80, N 1.

20. Медведев Ю. А., Степанов Б. М., Труханоя Г. Я. Ядерно-физические константы взаимодействия с элементами, входящими в состав атмосферы и земной коры: Справочник: **М.:** Энергоиздат, **1981**

21. Mughabghab S. F., Divadeenam M., Holden W. E. Neutron Cross Sections. N. Y.: Academic Press, **1981.** Vol. 1: Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Secitons. P. A., **2=1-4-60.**

22. **Nuclear** Wallet Cards/Ed by V. S. Shirley, C. M. Lederer. N Y: NBS, Office of Standord Reference Data, 1979.

23. Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В. Ядерно-физические константы: Справочник. М.: Атомиздат, 1963.

24. **Mughabghab** S. **F., Carder D. I.** Neutron Gross Sections. — 3rd ed. National Neutron Cross Section Cener. BNL-325. Brookhaven National Laboratory Associated Universities, Inc., 1973. Vol. 1: Resonance Parameters

25. **Оцененные** нейтронные данные для расчета тепловых реакторов/Л. П. Абагян, М. С. Юдкевич//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы М.: ЦНИИатоминформ, 1981. Вып. 4(43). С. 24-52.

26. Горбачев В. М., **Замятнин** Ю. **С,** Лбов А. А Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер: Справочник. М.: Атомиздат, 1976

27. **Nuclear** Data Standards for Nuclear Measurements: Technical report series N 227. Vienna: IAEA, 1983,

28. Gryntakis E. M., Kim J. **I.**//J. Radioanal. Chem 1983. Vol. 76, N 2. P. 341—496.

29. Garber D. I., Kinsey R. R. Neutron Gross Sections. Curvers — 3d. ed. National Neutron Cross Section Center. BNL-325, Brookhaven National Laboratory Associated Universities, Inc., 1976. Vol. 2.

30. **Сечения** пороговых реакций, вызываемых нейтронами: Справочнпк/Б. М. Бычков, В И. Мамохин, А Б. Пащенко, В. И. Пляскин. М.: Энергоиздат, **1982.**

31. **Tsukada** K. Table of Nuclear Reactions and Subsequent Radioactive Decays Induced by 14-MeV Neutrone. JAERI l252. Japan Atomic Energy Research Institute, 1977.

32. Лапеиас А. А. Измерение спектров нейтронов активационным методом. Рига: Зинатне, 1975.

33. Ломакин С. С., Петров В. И., Самойлов П. С. Радиометрия нейтронов активационным методом М.: Энергоатомиздат, 1983.

34. Крамер-Агеев Е. А., Трошин В. **С.,** Тихонов Е. **Г.** Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1976.

35. **О** выборе оптимального набора активацнонных детекторов для спектрометрии нейтронов в сборках с внешним источником 14-МэВ-нейтронов/Х. И. Бондаре, В. А. Загрядский, В. М. Новиков, Д. Ю. Чувилин. Препринт ИАЭ-3798/4. М., 1983.

36. **Handbook** of Nuclear Activation Cross Sections: Technical reports series N 156. Vienna: IAEA, 1974.

37. Усачев Л. **Н., Бобков Ю. Г.** Теория возмущений **и** планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов. М.: Атомиздат, 1980.

38. **Галанин** А. Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984

39. Таблицы физических величин: Справочник/Под. ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

40. Спектры медленных нейтронов: Сб. статей: Пер. **с** англ. М.: Атомиздат, 1971.

41. Импульсный метод в нейтронной физике/Под. ред. П. Гриблера, Э. Хенли: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1968.

42. Жежерун И. Ф. Экспериментальное изучение некоторых вопросов физики ядерных реакторов с кристаллическими замедлителями: Автореф. дне. . . . д-ра физ.-мат. наук., 1974.

43. Barbier M. Induced Radioactivity. Amsterdam — Lond.: North-Holland Publ. Cотр., 1969.

44 **Handbook** on Nuclear Activation Data. Technical report series № 273. Vienna: IAEA, 1987.

Глава 42

ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

В. п. Рудаков

42.1. ПРОХОЖДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Тяжелые (тяжелее электрона) заряженные частицы, проходя через вещество, теряют энергию главным образом на ионизацию и возбуждение атомов вещества. Характеристикой потери энергии является удельная потеря энергии ***dEjdx,*** МэВ/см, или (1р) ***dEjdx,*** МэВ/{мг-см-2), гдер — плотность вещества, мг/см^. Удельные потери энергии называют также тормозной способностью вещества.

Тормозную способность вычисляют по формуле Бете:

$$-\frac{dx}{} \qquad L \qquad J^{1}-P") \qquad ' \qquad J$$

где ***е*** и Ше — заряд и масса электрона; п — число атомов в 1 см^ вещества и ***Z*** — его атомный номер; ***v*** и г — скорость и заряд падающей частицы; р=у/с (с — скорость света); ***I*** — средний потенциал ионизации атома вещества; Qmax — максимальная энергия, передаваемая частицей атомному электрону; t/— поправка, учитывающая энергию связи электронов на K- и L-оболочках атомов; б — поправка, связанная с так называемым эффектом плотности. В диапазоне энергии падающих частиц 1—100 МэВ поправками t/ и б можно пренебречь.

Пробег ***R*** частицы с начальной энергией ***E*** описывается формулой $^{\wedge}\frac{dE}{dEldx'}$, единица пробега — см или мг/см^.

Поскольку тяжелая заряженная частица с энергией 1—100 МэВ в каждом акте взаимодействия с атомными электронами теряет лишь малую долю своей энергии, пучок моноэнергетических заряженных частиц, проходя через вещество, практически не меняет интенсивность вплоть до конца пробега. Статистические флуктуации потерь энергии приводят лишь к небольшому (1—2%) разбросу пробегов (стреглингу). Выход тяжелых заряженных частиц из пучка в результате многократного рассеяния оценивается по формулам, приведенным ниже.

Из формулы Бете видно, что тормозная способность какого-либо вещества для данной частицы зависит лишь от заряда и скорости этой частицы. Поэтому, зная, например, пробег протона, можно вычислить пробеги дейтронов и тритонов в этом же веществе по формуле

$$\frac{}{Пр}$$

где ***Rp, гпр*** и — ***E*** — пробег, масса и энергия протона соответственно; ***Rm, m*** и ***E*** — пробег, масса и энергия дейтрона или тритона. Точно так же, зная пробег а-частицы, можно по этой формуле вычислить пробег ионов зне+ и т. д.

Кроме того, зная пробег какой-либо одной частицы с зарядом Z и массой ***m,*** можно приближенно вычислить пробег любой другой частицы с зарядом Zi и массой т.. по формуле

$$\frac{}{nii}$$

где ***E*** и — ***E*** — энергии частиц /П] ***и m; F*** — поправочный множитель, заметно отличающийся от единицы лишь при больших энергиях. Эта формула не учитывает процессов перезарядки при малых энергиях и поэтому справедлива при энергиях выше 5 МэВ.

В табл. 42.1—42.20 приведены значения пробега и гормозной способности для ионов начала периодической системы (от водорода до неона), наиболее часто встречающихся как ускоренные частицы и как продукты ядерных реакций в некоторых веществах. Более полные таблицы пробегов опубликованы в [1—3].

Таблиц 42.1. **Массовая тормозная способность веществ,** МэВ/(мг-см-2), **для ионов водорода** [I]
энергия на единицу массы падающей частицы; Я — полная энергия

МэВ/а.е. м.	Бе	С	А1	Ti	Ni	Ge	zr	Ag	Eu	Ta	Au	и	*Е,* МэВ
0,0125	0,348	0,288	0,211	0,140	0,114	0,103	0,096	0,089	0,056	0.048	0,044	0.038	0,0126
0,0160	0,394	0,326	0,239	0,159	0,129	0,117	0,108	0,100	0,064	0.055	0,050	0,043	0,0161
0,0200	0,441	0,364	0,267	0,178	0,144	0,131	0,121	0,112	0,071	0,061	0,056	0,048	0,0202
0,0250	0,497	0,411	0,301	0.200	0,163	0,148	0,137	0,126	0,080	0,069	0,063	0,054	0,0252
0,0320	0,559	0,463	0,339	0,225	0,183	0,167	0,154	0,142	0,091	0,078	0,072	0,061	0,0322
0,0400	0,611	0,509	0,371	0,248	0,202	0,184	0,170	0,157	0,100	0.086	0,079	0,068	0,0403
0,0500	0,655	0,549	0,400	0,268	0,220	0,200	0,184	0,171	0,108	0.094	0,087	0,075	0,0504
0,0600	0,683	0,578	0,419	0,282	0,232	0,211	0,195	0,180	0,116	0.101	0,093	0,080	0,0605
0,0700	0,699	0,598	0,430	0,292	0,241	0,219	0,202	0,188	0,121	0.105	0,098	0,084	0,0705
0,0800	0,707	0,613	0,437	0,298	0,247	0,224	0,207	0.192	0.125	0,109	0.101	0,087	0,0806
0,0900	0,709	0,622	0,440	0,303	0,251	0,228	0,210	0,195	0,128	0,112	0,104	0,090	0,0907
0,1000	0,706	0,628	0,440	0,305	0,253	0,230	0,211	0,198	0,130	0,114	0,106	0,091	0,1008
0,1250		0,635	0,433	0,305	0,255	0,231	0,212	0.199	0,133	0,116	0,109	0,094	0,1260
0,1600	o!651	0,632	0,415	0,297	0,250	0,226	0,208	0.195	0,133	0,117	0,109	0,095	0,1612
0,2000	0,605	0,614	0,391	0,284	0,240	0,218	0,200	0.187	0,130	0,114	0,107	0,094	0,2016
0,2500	0,551	0,580	0,362	0,268	0,227	0,206	0,189	0.177	0,125	0,110	0,104	0,090	0,2519
0,3200	0,488	0,530	0,327	0,246	0,210	0,192	0,175	0,164	0,117	0,104	0,098	0,086	0,3225
0,4000	0,431	0,478	0,295	0,225	0,193	0,177	0,161	0,151	0,110	0,098	0,092	0,080	0,4031
0,5000	0,376	0,423	0,263	0,203	0,176	0,162	0,147	0,137	0,102	0,090	0,085	0,075	0,5039
0,6000	0,331	0.373	0,236	0,185	0,161	0,148	0,135	0,125	0,094	0,084	0,079	0,070	0.6047
0,7000	0,298	0,034	0,216	0,170	0,149	0,137	0,124	0,116	0,088	0,078	0,074	0,066	0.7055
0,8000	0,271	0,302	0,199	0,159	0,139	0,129	0,117	0,109	0,082	0,074	0,070	0,062	0,8062
0,9000	0,249	0,275	0,186	0,149	0,131	0,122	0,110	0,102	0,078	0,071	0,067	0,059	0,9070
1,0000	0,231	0,253	0,174	0,141	0,124	0,115	0,104	0,097	0,075	0,067	0,064	0,057	1,0078
1,2500	0,196	0,210	0,151	0,124	0,111	0,103	0,093	0,086	0,068	0,061	0,058	0,052	1,2597
1,6000	0,163	0,171	0,129	0,108	0,096	0,090	0,081	0.075	0,060	0,054	0,051	0,046	1,6125
2,0000	0,138	0,144	0,111	0,094	0,084	0,079	0,071	0,066	0,053	0,049	0,046	0,041	2,0156
2,5000	0,115	0,121	0,095	0,082	0,074	0,069	0,062	0,058	0,047	0,043	0,041	0,037	2,5195
3,2000	0,095	0,100	0,079	0,069	0,063	0,059	0,053	0,049	0,041	0,038	0,036	0,032	3,2250
4,0000	0,079	0,084	0,067	o! 059	0,054	0,051	0,046	0,043	0,036	0,033	0,031	0,029	4,0312
5,0000	0.06C	0,071	0,057	0,051	0,047	0,044	0,040	0,037	0,031	0.029	0,028	0,025	5.0395
6,0000	0,057	0,061	0,050	0,045	0,041	0,039	0,035	0.032	0,028	0,026	0,025	0,023	6.0468
7,0000	0,050	0,054	0,044	0,040	0,037	0,035	0,032	0,029	0,025	0,023	0,022	0,021	7,0546
8,0000	0,045	0,049	0,040	0,036	0,034	0,032	0,029	0,027	0,023	0.021	0,021	0,019	8,0624
9,0000	0,044	0,045	0,037	0,033	0,031	0,029	0,027	0,025	0,022	0,020	0,019	0,018	9,0702
10,0000	0,038	0,041	0,034	0,031	0,029	0,027	0,025	0,023	0,020	0,019	0,018	0,017	10,078
11,0000	0,035	0,038	0,032	0,029	0,027	0,025	0,023	0,022	0,019	0,018	0,017	0,016	11.086
12,0000	0,033	0,036	0,030	0,027	0,025	0,024	0,022	0,020	0,018	0,017	0,016	0,015	12,094

МэВ/а.е. м.	н	Не	N	о	Ne	Ar	Кг	Хе	Rn	Майлар		Вода	лГэВ
0,0125	0,792	0,338	0,224	0,210	0,187	0,123	0,076	0,054	0.035	0,283	0,360	0.275	0,0126
0,0160	0,879	0,371	0,249	0,234	0,208	0.141	0,087	0,062	0,041	0,318	0,405	0,306	0,0161
0,0200	0,956	0,392	0,272	0,256	0,229	0,159	0,099	0.072	0,048	0.353	0,449	0,333	0.0202
0,0250	1,048	0,416	0,299	0,282	0,255	0,183	0,117	0,085	0,062	0,394	0,502	0,367	0.0252
0,0320	1,156	0,439	0,325	0,309	0,283	0,212	0,138	0,104	0,072	0,441	0.562	0,403	0,0322
0,0400	1,244	0,'452	0,347	0,334	0,307	0,240	0,159	0,122	0,087	0,481	0,614	0,435	0,0403
0,0500	1,329	0,466	0,368	0,358	0,333	0,268	0,181	0,141	0,102	0,518	0.660	0,465	0,0504
0,0600	1,399	0,479	0,388	0,375	0,355	0,292	0,198	0,156	0,115	0,545	0,696	0,489	0,0605
0,0700	1,459	0,494	0,405	0,393	0,373	0,311	0,212	0,168	0,124	0,566	0,721	0,511	0,0705
0,0800	1,516	0,509	0,420	0,408	0,388	0,326	0,224	0,178	0.132	0,582	0,742	0,531	0.0806
0,0900	1,561	0,524	0,433	0,422	0,402	0,339	0,233	0,186	0,138	0,595	0.756	0,549	0,0907^
0,1000	1,610	0,540	0,448	0,434	0,413	0,350	0,242	0,192	0,143	0,604	0.768	0,565	0,1008
0,1250	1,719	0,574	0,474	0,457	0,436	0,368	0,254	0,202	0,150	0,621	0.790	0,597	0,1260
0,1600	1,837	0,613	0,503	0,484	0,460	0,383	0,263	0,209	0,155	0,633	0.805	0,635	0,1612
0,2000	1,919	0,637	0,522	0,501	0,474	0,385	0,262	0,208	0,154	0,631	0,800	0,658	0,2016
0,2500	1,962	0,649	0,527	0,507	0,473	0,374	0,253	0,198	0,146	0,613	0,777	0,669	0,2519
0,3200	1,943	0,634	0,516	0,492	0,450	0,345	0,230	0,180	0.131	0,576	0,732	o', 654	0,3225
0,4000	1,839	0,607	0,482	0,458	0,415	0,310	0,205	0,159	0.116	0,528	•0.673	0,612	0,4031
0,5000	1,678	0,558	0,433	0,412	0,369	0,271	0,179	0,140	0.102	0,472	0,602	0,553	0,5039
0,6000	1,501	0,503	0,381	0,362	0,324	0,237	0,157	0,122	0.090	0,416	0.534	0,488	0,6047

с МэВ/а.е. м.	н	Не	N	о	Ne	Ar	Кг	Хе	Rn	Мгйлар	(СНг)^	Вода	
. 0,7000	1,325	0,455	0,335	0,318	0,285	0,208	0,139	0,108	0,080	0,370	0,475	0,430	0,7055
0,8000	1,169	0,410	0,297	0,283	0,253	0,185	0,125	0,098	0,073	0,331	0,426	0,381	0,8062
0,9000	1,039	0,370	0,265	0,253	0,225	0,166	0,113	0,089	0,066	0,300	0,384	0,340	0,9070
1,0000	0,938	0,339	0,242	0,230	0,205	0,152	0,104	0,083	0,062	0,274	0,351	0,308	1,0078
1,2500	0,753	0,282	0,201	0,192	0,170	0,128	0,090	0,072	0,055	0,227	0,288	0,254	1,2597
1,6000	0,583	0,228	0,165	0,158	0,141	0,108	0,077	0,063	0,049	0,184	0,230	0,205	1,6125
2,0000	0,460	0,188	0,140	0,133	0,120	0,093	0,068	0,056	0,044	0,153	0,189	0,169	2,0156
2,5000	0,359	0,154	0,118	0,112	0,103	0,082	0,061	0,051	0,040	0,128	0,155	0,140	2,5195
3,2000	0,278	0,124	0,098	0,094	0,087	0,070	0,053	0,045	0,036	0,105	0,125	0,114	3,2250
4,0000	0,223	0,101	0,082	0,079	0,074	0,061	0,047	0,039	0,032	0,088	0,104	0,095	4,0312
5,0000	0,182	0,083	0,069	0,067	0,063	0,052	0,040	0,034	0,028	0,074	0,087	0,079	5,0390
6,0000	0,155	0,071	0,060	0,058	0,055	0,046	0,036	0,030	0,025	0,064	0,075	0,069	6,0468
7,0000	0,137	0,062	0,053	0,051	0,049	0,041	0,032	0,027	0,023	0,057	0,066	0,061	7,0546
8,0000	0,122	0,055	0,048	0,046	0,044	0,037	0,029	0,025	0,021	0,051	0,060	0,055	8,0624
9,0000	0,111	0,050	0,044	0,042	0,040	0,034	0,027	0,023	0,019	0,047	0,054	0,050	9,0702
10,0000	0,102	0,046	0,040	0,039	0,037	0,031	0,025	0,021	0,018	0,043	0,050	0,046	10,078
11,0000	0,094	0,043	0,038	0,036	0,034	0,029	0,023	0,020	0,017	0,040	0,046	0,043	11,086
12,0000	0,087	0,040	0,035	0,034	0,032	0,027	0,022	0,019	0,016	0,037	0,043	0,040	12,094

Таблица 42.2. Пробег R, мг/см^, ионов водорода {н+ в различных веществах [1]
— энергия на единицу массы падающей частицы; ***Е*** — полная энергия

Е МэВ/а.е.м.	Be	С	Аı	Ti	Ni	Ge	7v	Ag	Еш	Та	Au	L	
0,0125	0,059	0,070	0,102	0,158	0,193	0,216	0,231	0,246	0,373	0,421	0,449	0,491	0,0126
0,0160	0,068	0,082	0,118	0,181	0,222	0,247	0,265	0,283	0,430	0,488	0,521	0,575	0,0161
0,0200	0,078	0,093	0,134	0,205	0,251	0,279	0,300	0,320	0,489	0,556	0,595	0,661	0,0202
0,0250	0,089	0,106	0,151	0,231	0,283	0,315	0,338	0,362	0,554	0,632	0,678	0,757	0,0252
0,0320	0,102	0,122	0,173	0,264	0,323	0,360	0,386	0,414	0,635	0,727	0,781	0,877	0,0322
0,0400	0,116	0,139	0,196	0,298	0,365	0,406	0,436	0,468	0,719	0,824	0,886:	0,999	0,0403
0,0500	0,132	0,158	0,222	0,337	0,413	0,458	0,493	0,529	0,815	0,935	1,006	1,139	0,0504
0,0600	0,147	0,175	0,246	0,374	0,458	0,507	0,546	0,586	0,905	1.038	1,117	1,268	0,0605
0,0700	0,161	0,193	0,270	0,409	0,500	0,554	0,597	0,641	0,990	1,136	1,223	1,391	0,0705
0,0800	0,175	0,209	0,293	0,443	0,541	0,600	0,646	0,694	1,072	1,230	1,324	1,509	**0,0806**
0,0900	0,190	0,226	0,316	0,476	0,582	0,644	0,694	0,746	1,152	1,321	1,423	1,623	0,0907
0,1000	0,204	0,242	0,339	0,510	0,622	0,688	0,742	0,797	1,230	1,410	1,519	1,734	Q,1008
0,1250	0,240	0,281	0,397	0,592	0,721	0,798	0,861	0,924	1,421	1,629	1,754	2,006	0,1260
0,1600	0,293	0,337	0,480	0,709	0,861	0,952	1,029	1,103	1,686	1,931	2,077	2,378	0, 1612
0,2000	0,357	0,402	0,580	0,848	1,025	1,133	1,227	1,314	1,993	2,280	2,448	2,804	0,2016
0,2500	0,444	0,486	0,714	1,031	1,241	1,371	1,486	1,591	2,389	2,728	2,926	3,351	0,2519
0,3200	0,580	0,614	0,919	1,306	1,564	1,726	1,874	2,006	2,973	3.387	3,628	4,151	0,3225
0,4000	0,756	0,774	1,179	1,649	1,964	2,164	2,355	2,520	3,685	4.188	4,481	5,122	0,4031
0,5000	1,007	0,998	1,542	2,122	2,511	2,761	3,010	3,222	4,642	5,262	5,624	6,422	0,5039
0,6000	1,293	1,253	1,947	2,642	3,110	3,412	3,727	3,992	5,676	6,421	6,855	7,814	0,6047
0,7000	1,615	1,539	2,394	3,210	3,761	4,119	4,506	4,828	6,789	7,666	8,174	9,301	0,7055
0,8000	1,971	1,857	2,881	3,824	4,461	4,877	5,344	5.726	7,976	8,990	9.577	10,881	0,8062
0,9000	2,359	2,207	3,405	4,480	5,207	5,682	6,235	6,684	9,230	10,385	11,054	12,541	0,9070
1,0000	2,780	2,589	3,967	5.177	5,997	6,533	7,178	7,697	10,546	11,848	12,602	14.275	1,0078
1,2500	3.967	3,685	5,524	7,088	8,153	8,851	9,746	10,461	14,095	15,789	16,769	18,935	1,2597
1,6000	5,944	5,552	8,056	10,148	11,584	12,529	13,827	14,869	19,647	21,933	23,269	26,189	1,6125
2,0000	8,643	8,132	11,435	14,165	16,068	17,317	19,155	20,629	26,796	29,798	31,589	35.443	2,0156
2,5000	12,661	11,975	16,361	19,938	22,471	24,137	26,772	28,843	36,865	40,850	43,256	48,349	2,5195
3,2000	**19,456**	18,433	24,518	29,373	32,867	35,196	39,120	42,169	52,948	58,480	61,830	68,810	3,2250
4,0000	**28,827**	27,268	35,569	42,008	46,704	49,898	55,475	59,875	74,010	81,494	86,028	95.428	4,0312
5,0000	42,846	40,387	51,855	60,461	66,794	71,210	79,124	85,476	104,075	114,385	120,447	133,199	5,0390
6,0000	59,307	55,720	70,767	81,732	89,870	95,609	106,176	114,724	138,207	151,568	159,272	175,591	6,0468
7,0000	78,125	73,180	92,199	105,704	115,830	122.961	136.444	147.441	176,200	192,816	202,300	222,377	7,0546
8,0000	99,234	92,701	116,062	132,276	144,562	153,185	169,769	183.485	217,769	237,963	249,315	273,414	8,0624
9,0000	122,542	114,237	142,282	161,361	175,962	186,185	206,058	222,734	262,856	286,831	300,174	328,493	9,0702
10.0000	147 989	137,754	170,795	192,866	209,966	221,870	245,277	265,037	311,387	339,290	354,688	387,461	10,078
11,0000	175 ,'544	163,200	201,546	226,713	246,486	260,164	287,342	310,256	363,240	395,146	412,594	450,213	11,086
12,0000	205,152	190,534	234,483	262,868	285,442	300,978	332,155	358,304	418,272	454,277	473,872	516,684	12,094

продолжение табл. 42.2

МэВ/а.(	и	Не	N	о	Ne	Ar	Кг	Хе	Rn	Майлар		Вода	Я, МэВ
0,0125	0,022	0,056	0,089	0,095	0,109	0,174	0,292	0,403	0,562	0,068	0,052	0,067	0,0126
0,0160	0,026	0,065	0.104	0,111	0,126	0.200	0,334	0,463	0,651	0,080	0,061	0,079	0,0161
0,0200	0,030	0,076	0,119	0,127	0,144	0,227	0,377	0,522	0,739	0,092	0,070	0,091	0,0202
0,0250	0,035	0,088	0,136	0,146	0,165	0,256	0,423	0,585	0,829	0,105	0,081	0,105	0,0252
0,0320	0,041	0,104	0,159	0,169	0,191	0,292	0,478	0,659	0,933	0,122	0,094	0,123	0,0322
0,0400	0,048	0,122	0,182	0,194	0,218	0,327	0,533	0,730	1,033	0,139	0,107	0,142	0,0403
0,0500	0,056	0,144	0,210	0,223	0,249	0,367	0,592	0,807	1,139	0,159	0,123	0,164	0,0504
0,0600	0,063	0,166	0,237	0,251	0,279	0,403	0,645	0,875	1,232	0,178	0,138	0,185	0,0605
0,0700	0,070	0,186	0,263	0,277	0,306	0,436	0,694	0,937	1,316	0,196	0,152	0,206	0,0705
0,0800	0,077	0,206	0,287	0,302	0,333	0,468	0,740	0,995	1,394	0,214	0,166	0,225	0,0806
0,0900	0,083	0,226	0,311	0,326	0,358	0,498	0,784	1,050	1,469	0,231	0,179	0,244	0,0907
0.1000	0,090	0,245	0,333	0,350	0,383	0,527	0,827	1,103	1,541	0,248	0,193	0,262	0,1008
0,1250	0,105	0,290	0,388	0,406	0,442	0,597	0,928	1,231	1,712	0,289	0,225	0,305	0,1260
0,1600	0,125	0,349	0,460	0,481	0,521	0,691	1,065	1,402	1,943	0,345	0,269	0,362	0,1612
0,2000	0,146	0,414	0,539	0,563	0,607	0,796	1,219	1,596	2,204	0,409	O!319	0,424	0,2016
0,2500	0,172	0,492	0,635	0,663	0,714	0,929	1,414	1,844	2,541	0,490	0,383	0,500	0,2519
0,3200	0,208	0,602	0,770	0,804	0,867	1,125	1,707	2,218	3.051	0,609	0,477	0,607	0,3225
0,4000	0,251	0,732	0,932	0,974	1,053	1,372	2,079	2,695	3,706	0,755	0.592	0,735	0,4031
0,5000	0,308	0,906	1,153	1,206	1,311	1,721	2,606	3.372	4,635	0,957	0,750	0,908	0,5039
0,6000	0,372	1,096	1,402	1,468	1,604	2,120	3,209	4,144	5,692	1,185	0,928	1,103	0,6047
0,7000	0,444	1,307	1,684	1,765	1,936	2,575	3,892	5,021	6,885!	1,442	1,129	1,323	0,7055
0,8000	0,525	1,540	2,004	2,101	2,312	3,089	4,657	6,002	8,209	1,730	1,353	1,572	0,8062
0,9000	0,616	1,799	2,364	2,479	2,736	3,665	5,505	7,082	9,662	2,050	1,602	1,852	0,9070
1,0000	0,718	2,084	2,762	2,897	3,206	4,301	6,433	8,251	11,237	2.403	1,877	2,164	1.0078
1,2500	1,019	2.902	3,909	4,102	4,560	6,119	9,045	11,508	15,585	3,418	2,673	3,067	1.2597
1,6000	1,554	4.298	5,856	6,140	6,845	9,138	13,298	16,756	22,446	5,153	4,050	4,620	1.6125
2,0000	2,336	6,248	8,522	8,934	9,948	13,167	18,863	23,567	31,173	7,563	5,992	6,792	2.0156
2,5000	3,582	9,216	12,465	13,075	14,479	18,947	26,709	33,053	43,166	11,178	8,953	10,083	2.5195
3,2000	5,827	14,351	19,060	19,995	21,953	28,283	39,129	47,972	61,844	17,293	14,045	15,702	3,2250
4,0000	9,081	21,609	28,071	29,413	32,030	40,662	55,340	67,335	85,883	25,701	21,140	23,481	4.0312
5,0000	14,110	32,706	41,483	43,369	46,857	58,666	78,649	94,977	119,798	38,231	31,808	35,137	5.0390
6,0000	20.125	45,939	57,172	59,674	64,112	79,413	105,264	126,386	157,996	52,904	44,359	48,838	6,0468
7,0000	27,062	61,206	75,032	78,221	83,712	102,808	135,109	161,429	200,471	69,628	58,705	64,477	7,0546
8,0000	34,874	78,444	94,976	88,900	105,595	128,788	168,137	200,041	247,074	88,323	74,781	81,953	8,0624
9,0000	43,542	97,563	116,955	121,671	129,683	157,304	204,352	242,228	297.738	108,953	92,552	101,233	9,0702
10,0000	53,047	118,429	140,896	146,465	155,891	188,297	243,626	287,921	352,412	131,476	111,983	122,269	10,078
11,0000	63,367	140,982	166,715	173,205	184,154	221,721	285,865	337,042	411.094	155,833	133,023	144,996	11,086
12,0000	74.495	165,192	194,371	201,846	214,428	257,523	330,985	389,490	473.713	181,985	155,646	169,377	12,094

Таблица 42.3. Массовая тормозная способность веществ, **МэВ/(мг-см-2), для** ионов **гелия** ^He+ **[1]**

Ещ — энергия на единицу массы падающей частицы; *Е* — полная энергия

МэВ/а.е. м	Be	С	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	и	*Е.* МэВ
0,0125	0,877	0,726	0,532	0,354	0,287	0,261	0,241	0,223	0.142	0,121	0,112	0,096	0,0500
0,0160	0,993	0,821	0,602	0,400	0,325	0,295	0,273	0,253	0,161	0,137	0,126	0,108	0,0640
0,0200	1,110	0,918	0,673	0,447	0,363	0,330	0,305	0,282	0,180	0,154	0,141	0,121	0,0801
0,0250	1,241	1.026	0,752	0,500	0,406	0,368	0,341	0,316	0,201	0,172	0,158	0,135	0,1001
0,0320	1,403	1.163	0,852	0,566	0,461	0,419	0,387	0,358	0,227	0,195	0,180	0,154	0,1281
0,0400	1,554	1,294	0,945	0,631	0,514	0,469	0,432	0,400	0,254	0,219	0,201	0,173	0,1601
0,0500	1,704	1,428	1,040	0,697	0,571	0,520	0,479	0,444	0,282	0,245	0,226	0,194	0,2001
0,0600	1,819	1,539	1,115	0,751	0,617	0,561	0,518	0,480	0.308	0,267	0,247	0,212	0,2402
0,0700	1,906	1,631	1,173	0,795	0,657	0,596	0,551	0,511		0,287	0,266	0,229	0,2802
0,0800	1,972	1,709	1,219	0,832	0,689	0,624	0,576	0,536	O!347	0,305	0,282	0,243	0,3202
0,0900	2,020	1,773	1,254	0,863	0,715	0,649	0,598	0,557	0.365	0,319	0,296	0.255	0,3602
0,1000	2,054	1,827	1,280	0,887	0,737	0,668	0,614	0,575	0,379	0,332	0,307	0,265	0,4003
0,1250	2,094	1,932	1,317	0,927	0,774	0,702	0,645	0,604	0,405	0,354	0,331	0,286	0,5003
0,1600	2,077	2,018	1,323	0,948	0,797	0,723	0,663	0,622	0,424	0,372	0,349	0,304	0,6404
0,2000	2,010	2,040	1,299	0,944	0,799	0,723	0,664	0,622	0,431	0,380	0,357	0,312	0,8005
0,2500	1,901	1,999	1,248	0,922	0,784	0,711	0,651	0,6i0	0,431	0,381	0,357	0,312	Ь0007

Продолоюение табл. 42 13

Ms&.'e.M	Be	C	Ат	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	та	». 1	.
0,3200	1,745	1,896	1,170	0,881	0,752	0,686	0,626	0,585	0,419	0,372	0,349	0,307
0,4000	1,587	1,762	1,086	0,827	0,712	o^esi	0,594	0,555	0,404	0,359	0,338	0,296
0,5000	1,424	1,601	0,996	0,770	0,667	0,613	0,558	0,520	0,384	0,343	0,322	0,284
0,6000	**1,268**	1,428	0,904	0,708	0,617	0,568	0,515	0,480	0,359	0,321	0,302	
0,7000	**1,148**	1,288	0,832	0,657	0,575	0,530	0,480	0,448	0,338	0,302	0,285	o^253
0,8000	1,050	1,171	0,773	0,616	0,541	0,500	0,452	0,422	0,320	0,288	0,271	0,241
0,9000	0,972	1,074	0,724	0,581	0,512	0,475	0,429	0,399	0,306	0.275	0,260	0,232
1,0000	0,905	0,991	0,682	0,552	0,487	0,452	0,409	0,380	0,293	0,264	0,250	0,223
1,2500	0,775	0,830	0,598	0,490	0,436	0,407	0,366	0,340	0,267	0,241	0,228	0,204
1,6000	0,649	0,680	0,512	0,428	0,382	0,357	0,322	0,297	0,238	0,216	0,204	0,183
2,0000	0,548	0,572	0,442	0,374	0,336	0,316	0,283	0,262	0,212	0,194	0,183	0,165
2,5000	0,459	0,481	0,379	0,325	0,294	0,277	0,247	0,230	0,189	0,172	0,163	0,148
3,2000	0,378	0,399	0,318	0,276	0,252	0,237	0,212	0,186	0,164	0,150	0,142	0,129
4,0000	0,316	0,336	0,270	0,237	0,217	0,205	0,184	0,170	0,144	0,132	0,125	0,114
5,0000	0,264	0,283	0,229	0,203	0,187	0,176	0,159	0,147	0,126	0,115	0,110	0,100
6,0000	0,228	0,246	0,200	0,178	0,164	0,156	0,141	0,130	0,111	0,103	0,098	0,090
7,0000	0,202	0,218	0,178	0,159	0,147	0,140	0,127	0,117	0,101	0,093	0,089	0,082
8,0000	0,181	0,196	0,161	0,145	0,134	0,127	0,116	0,107	0,093	0,086	0,082	0,076
9,0000	0,165	0,179	0,147	0,133	0,123	0,117	0,107	0,099	0,086	0,080	**0,076**	0,071
10,0000	0,152	0,165	0,136	0,123	0,114	0,109	0,099	0,092	0,080	0,074	**0,072**	**0,066**
11,0000	0,141	0,153	0,127	0,115	0,107	0,102	0,093	0,086	0,075	0,070	**0,068**	0,062
12,0000	0,132	0,143	0,118	0,108	0,100	0,096	0,087	0,082	0,071	0,066	**0,064**	0,059

КэВ/^.е.м	H	He	N	o	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	
0,0125	1,994	0,851	0,564	0,530	0,471	0,311	0,190	0,135	0,089	0,713	0,907	0,692
0,0160	2,214	0,934	0,627	0,590	0,525	0,354	0,220	0,156	0,104	0,802	1,020	0,771
0,0200	2,408	0,989	0,684	0,644	0,576	0,400	0,250	0,182	0,121	0,889	1,131	0,840
0,0250	2,617	1,038	0,746	0,703	0,636	0,456	0,292	0,213	0,154	0,985	1,254	0,916
0,0320	2,904	1,102	0,817	0,777	0,710	0,532	0,346	0,261	0,181	1,107	1,412	1,013
0,0400	3,167	1,152	0,882	0,849	0,782	0,611	0,405	0,310	0,220	1,224	1,562	1,106
0,0500	3,442	1,211	0,956	0,930	0,865	0,698	0,470	0,366	0,265	1,346	1,716	1,208
0,0600	3,723	1,274	1,033	0,999	0,944	0,777	0,528	0,416	0,305	1,450	1,851	1,302
0,0700	3,977	1,347	1,103	1,071	1,016	0,847	0,577	0,459	0,339	1,542	1,966	1,394
0,0800	4,229	1,420	1.171	1,138	1,084	0,910	0,624	0,497	0,369	**1,623**	2,068	1,482
0,0900	4,451	1,493	1,235	1,204	1,146	0,967	0,665	0,532	0,394	**1,695**	2,155	1,565
0,1000	4,685	1,572	1,303	1,262	1,201	1,018	0,703	0,559	0,415	**1,757**	2,235	1,642
0,1250	5,227	1,745	1,442	1,389	1,327	1,121	0,772	0,615	0,457	**1,888**	**2,403**	1, 816
0,1600	5,863	1,955	1,604	1,546	1,466	1,222	0,838	0,667	0,495	2,021	**2,568**	2,025
0,2000	6,376	2,117	1,734	1,665	1,574	1,279	0,870	0,691	0,510	2,096	2,660	2,188
0,2500	6,764	2,239	1,816	1,748	1,632	1,290	0,872	0,684	0,503	2,114	2,679	2,306
0,3200	6,947	2,268	1,844	1,760	1,610	1,234	0,823	0,642	0,469	2,061	2,617	2,337
0,4000	6,775	2,237	1,776	1,688	1,529	1,141	0,755	0,587		**1,947**	2,479	2,254
0,5000	6.355	2,112	1,640	1,561	1,396	1,027	0,677	0,529	o',385	**1,786**	2,280	2,094
0,6000	5,742	1,926	1,458	1,385	1,238	0,905	0,600	0,468	0,343	1,593	**2,044**	1,869
0,7000	5,110	1,756	1,292	1,227	1,098	0,802	0,537	0,418	0,309	1,427	**1,834**	1,659
0,8000	4,540	1,593	1,152	1,098	0,982	0,718	0,486	0,379	0,282	1,287	1,652	1,480
0,9000	4,056	1,446	1,036	0,987	0,878	0,647	0,442	0,349	0,259	1,170	1,500	1,328
1,0000	3,676	1,329	0,949	0,900	0,802	0,594	0,409	0,326	0,242	1,073	1,374	1.209
1,2500	2,971	1,113	0,792	0,756	0,672	0,504	0,354	0,286	0,216	0,895	1,137	1,003
1,6000	2,316	0,907	0,655	0,626	0,561	0,428	0,307	0,250	0,193	0,730	0,914	0.814
2,0000	1,830	0,750	0,556	0,530	0,479	0,372	0,272	0,223	0,175	0,610	0,751	0.674
2,5000	1.432	0,616	0,470	0,447	0,413	0,327	0,242	0,202	0,161	0,510	0,617	0.557
3,2000	1,112	0,494	0,392	0,374	0,347	0,281	0,214	0,178	0,143	0,420	0,501	0.456
4,0000	0,891	0,403	0,329	0,316	0,297	0,243	0,186	0,157	0,127	0,352	0,415	0,380
5,0000	0,728	0,331	0,277	0,266	0,251	0,208	0,162	0,137	0,112	0,296	0,347	0.318
6,0000	0,621	0,282	0,240	0,231	0,219	0,183	0,143	0,121	0,100	0,256	0,299	0,274
7,0000	0,546	0,248	0,213	0,206	0,194	0,163	0,128	0,110	0,091	0,228	0,265	0,243
8,0000	0,489	0,221	0,192	0,186	0,175	0,148	0,116	0,100	0,083	0,205	0,238	0,219
9,0000	0,443	0,201	0,175	0,169	0,160	0,135	0,107	0,092	0,077	0,187	0,217	0,200
10,0000	0,407	0,186	0,162	0,156	0,148	0,125	0,099	0,085	0,071	0,172	0,199	0,184
11,0000	0,376	0,172	0,151	0,146	0,138	0,116	0,092	0,079	0,066	0,160	0,185	0,171
12,0000	0,350	0,161	0,141	0,136	0,129	0,109	0,087	0,075	0,062	0,149	0,172	0,160

Таблица 42.4. Пробег *Я*, мг/см^, ионов гелия в различных веществах [1]

Ят —энергия на единицу массы падающей частицы; Е— полная энергия

0,085	0,099	0,142	0,219	0,267	0,307	0,337	0,371	0,583	0,68E	0,746	0,874	0,0500
0,100	0,117	0,166	0,255	0,310	0,356	0,390	0,428	0,673	0,79C	0,86C	1,007	0,0640
0,114	0,135	0,190	0,292	0,356	0,406	0,444	0,487	0,764	0,897	0,976	1,143	0,0801
0,131	0,155	0,218	0,333	0,406	0,462	0,505	0,552	0,867	1,017	1,107	1,296	0,1001
0,152	0,180	0,252	0,385	0,470	0,532	0,580	0,634	0,996	1,167		1,486	0,1281
0,174	0,206	0,288	0,438	0,534	0,603	0,658	0,718	1,127	1,320	1,43Б	1,679	0,1601
0,198	0,235	0,327	0,498	0,607	0,684	0,745	0,812	1,27E	1,490	1,62C		0,2001
0,221	0,262	0,365	0,553	0,674	0,758	0,825	0,898	1,41C	1,645	1,788	2,09C	0,2402
0,243	0,287	0,400	0,604	0,737	0,827	0,900	0,979	1,53E	1,	1,944	2,271	0,2802
0,263	0,311	0,433	0,654	0,796	0,892	0,971	1,055	1,654	1,924	2,09C	2,441	0,3202
0,283	0,334	0,465	0,701	0,853	0,955		1,128	1,76E	2,053	2,229	2,602	0,3602
0,303	0,356	0,497	0,747	0,908	1,016	1Л05	1,199	1,874	2,176	2,365	2,756	0,4003
0,351	0,409	0,574	0,857	1,041	1,162	1,263	1,369	2,12E	2,467	2,67£	3,118	0,5003
0,418	0,480	0,680	1,006	1,218	1,358	1,477	1,597	2,46£	2,852	3,086	3,591	0,6404
0,496	0,559	0,802	1,175	1,419	1,579	1,718	1,854	2,84C	3,277	3,53S	4,110	0,8005
0,599	0,658		1,389	1,672	1,858	2,022	2,178	3,304	3,802	4,09S	4,751	1,0007
0,752	0,802	I!191	1,700	2,036	2,259	2,461	2,647	3,964	4,547	4,892	5,656	1,2808
0,945	0,977	1,475	2,075	2,474	2,738	2,986	3,209	4,74o	5,423	5,82E	6,718	1,6010
1,211	1,216	1,860	2,577	3,055	3,372	3,682	3,955	5,75f	6,564	7,03S	8,099	2,0013
1,510	1,481	2,283	3,120	3,680	4,052	4,430	4,758	6,836	7,773	8,325	9,551	2,4016
1,842	1,777	2,745	3,708	4,353	4,782	5,236	5,622	7,98£	9,060	9,687	И,	2,8018
2,207	2,103	3,244	4,337	5,072	5,560	6,095	6,544	9,207	10,418	11,12f	12,709	3,2021
2,604	2,460	3,779	5,006	5,833	6,381	7,004	7,521	10,48E	11,	12,635	14,402	3,6023
3,031	2,848	4,349	5,714	5,635	7,245	7,961	8,549	11,821	13,328	14,20E	16,164	4,0026
4,228	3,955	5,920	7,642	8,811	9,584	10,553	11,339	15,40^	17,304	18,411	20,866	5,0033
6,211		8,460	10,711	12,251	13,272	14,645	15,759	20,971	23,466	24,92f	28,141	6,4042
8,906	8,'403	11,835	14,723	16,729	18,054	19,967	21,512	28,111	31,320	33,237	37,383	8,0052
12,910	12,232	16,742	20,475	23,109	24,850	27,556	29,696	38,14^	42,332	44,865	50,241	10,007
19,669	18,656	24,857	29,860	33,450	35,850	39,838	42,951	54,141	59,869	63,336	70,594	12,808
28,981	27,434	35,838	42,415	47,199	50,459	56,090	60,545	75,07C	82,7	87,385	97,044	16,010
42,903	40,463	52,011	60,740	67,151	71,624	79,576	85,969	104,92f	115,401	121,564	134,555	20,013
59,245	55,686	70,787	81,859	90,060	95,848	106,434	115,008	138,814	152,31	160,11C	176,642	24,016
77,926	73,019	92,063	105,656	115,831	123,000	136,481	147,486	176,53C	193,26	202,82E		24,018
98,882	92,397	115,752	132,035	144,354	153,004	169,563	183,268	217,797	238,083	249,497	273,752	32,021
122,021	113,778	141,783	160,909	175,528	185,766	205,590	222.233	262,556	286,598	299,98S	328,	--,023
147,287	137,127	170,092	192,190	209,289	221,197	244,530	264.234	310,742	338,683	354,114		40,026
174,648	162,394	200,627	225,799	245,552	259,221	286,299	309,135	362,231	394,145	411,615	449,291	44,029
204,051	189,540	233,337	261,704	284,239	299,753		356,851	416,885	452,868	472,467	515,303	48,031

МэВ/а.е. м.	**н**	Не	**N**	и	Ne	Ar	Кг	Хе	Rn	Маплар		Вода	я, МэВ
0,0125	0,032	0,081	0,123	0,132	0,149	0,237	0,409	0,596	0,917	0,097	0,075	0,095	0,0500
0,0160	0,038	0,097	0,146	0,156	0,176	0,277	0,474	0,688	1,056	0,115	0,089	0,113	0,0640
0,0200	0,045	0,113	0,170	0,181	0,204	0,318	0,540	0,780	1,194	0,133	0,103	0,133	0,0301
0,0250	0,053	0,132	0,197	0,210	0,236	0,364	0,613	0,879	1,337	0,154	0,120	0,155	0,1001
0,0320	0,062	0,158	0,232	0,247	0,277	0,420	0,699	0,996	1,501	0,180	0,140	0,183	0,1281
0,0400	0,073	0,186	0,269	0,286	0,319	0,475	0,783	1,107	1,659	0,207	0,162	0,213	0,1601
0,0500	0,085	0,219	0,312	0,330	0,367	0,536	0,874	1,225	1,822	0,238	0,186	0,247	0,2001
0,0600	0,096	0,251	0,352	0,371	0,411	0,590	0,954	1,327	1,963	0,267	0,208	0,279	0,2402
0,0700	0,106	0,282	0,390	0,410	0,452	0,639	1,027	1,419	2,087	0,294	0,229	0,309	0,2802
0,0800	0,116	0,311	0,425	0,446	0,490	0,685	1,093	1,503	2,200	0,319	0,249	0,336	0,3202
0,0900	0,125	0,338	0,458	0,480	0,526	0,727	1,156	1,580	2,305	0,343	0,268	0,363	0,3602
0,1000	0,134	0,364	0,490	0,513	0,560	0,768	1,214	1,654	2,404	0,366	0,286	0,388	0,4003
0,1250	0,154	0,425	0,563	0,588	0,639	0,861	1,350	1,824	2,633	0,421	0,329	0,445	0,5003
0,1600	0,179	0,500	0,654	0,684	0,739	0,981	1,523	2,042	2,927	0,493	0,386	0,518	0,6404
0,2000	0,206	0,579	0,750	0,783	0,844	1,109	1,711	2,278	3,245	0,570	0,447	0,594	-С,8005
0,2500	0,236	0,671	0,863	0,900	0,969	1,264	1,940	2,569	3,640	0,665	0,522	0,683	1,0007
0,3200	0,277	0,795	1,016	1,060	1,142	1,486	2,271	2,991	4,217	0,799	0,627	0,804	1,2808
0,4000	0,323	0,937	1,193	1,246	1,346	1,756	2,677	3,513	4,932	0,959	0,753	0,943	1,6010
0,5000	0,385	1,121	1,428	1,493	1,620	2,126	3,238	4,232	5,919	1,174	0,922	1,128	2,0013
0,6000	0,451	1,320	1,687	1,765	1,925	2,542	3,867	5,038	7,022	1,412	1,107	1,330	**2,4016**
, 0,7000	0 525	1,538	1,979	2,073	2,269	3,013	4.573	5,944	8,255	1,678	1,314	1,558	**2,8018**

							Xe	Rn	Майлар (CH,)			
0,608	1,778	2,308	2,418	2,655	3,541	5,357	6,951		1,973		1,814	3,2021
0,701	2,042	2,674	2,803	3,087	4,128	**6,222**	8,052	11,096	2,300		2,09S	3,6023
0,805	2,331	3,079	3,227	3,564	4,774	7,164	9,239	12,695	2,658		2,416	4,0026
1,109	3,156	4,236	*4,44*	4,931	**6,608**	9,801	12,526	17,083	3,682		3,328	5,0033
1,645	4,556		6,487	7,222	9,636	14,065	17,789	23,963	5,422		4,88£	6,4042
2,426	6,504		9,277	10,321	13,660	19,623	24,590	32,679	7,829		7,054	8,0052
3,668	9,461	12,779	13,403	14,836	19,419	27,441	34,042	44,628	11,431		**10,33Г**	10,007
5,900	14,568	19,340	**20,286**	22,270	28,705	39,795	48,882	63,20S	17,513		15,922	12,808
9,134	21,781	28,294	29,645	32,283	41,006	55,903	68,123	87,095	25,868		23,652	**16,010**
14,129	32,801	41,613	43,505	47,007	58,885	79,051	95,574	120,77e	38,311		35,228	20,013
20,100	45,939	57,189	59,692	64,139	79,483	105,475	126,758	158,695	52,879		48,830	24,016
26,987	61,095	74,919	78,105	83,596	102,708	135,103	161,546	200,864	69,		64,355	28,018
34,742	78,207	94,718	98,633	105,319	128,499	167,891	199,876	247,128	88,040		81,703	32,021
43,347	97,188	116,539	121,239	129,234	156,809	203,844	241,758	297,426	108,521		100,844	36,023
52,785	117,905	140,308	145,857	155,254	187,581	242,838	287,126	351,710	130,		121,730	40,026
63,031		165,946	172,408	183,319	220,770	284,780	335,901	409,	155,069	132	144,298	44,029
74,083	164,'342	193,410	200,852	213,383	256,324	329,587	387,987	472,165	181,040		168,510	48,031

Таблица 42.5. Тормозная способность веществ, iM9B/(Mr-CM-2), для ионов лития 3Li+ [1]
Em — энергия на единицу массы налетающей частицы; — полная энергия

E МэВ/а.е. м	Be	c	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	EU	Ta	Au	i "	E, МэВ
0,0125	1,355	1,121	0,821	0,546	0,444	0,402	0,373	0,345	0,219	0,188	0,172	0,148	0,0877
0,0160	1,533	1,268	0,929	0,618	0.502	0,455	0,422	0,390	0,248	0,212	0,195	0,167	0,1123
0,0200	1,714	1,418	1,039	0,691	0,561	0,509	0,472	0,436	0,277	0,237	0,218	0,187	0,1403
0,0250	1,917	1,586	1,162	0.772	0,627	0,569	0,527	0,488	0,310	0,265	0,245	0,209	0,1754
0,0320	2,167	1,796	1,315	0,874	0,711	0,647	0,597	0,552	0,351	0,301	0,277	0,238	0.2245
0,0400	2,407	2,004	1,464	0,976	0,796	0,726	0,669	0,619	0,394	0,339	0,312	0,268	0,2806
0,0500	2,654	2,224	1,620	1,085	0,889	0,810	0.747	0,692	0,439	0,382	0,352	0,302	0,3508
0,0600	2,854	2,415	1,749	1,179	0,969	0,880	0,813	0,754	0,483	0.420	0,387	0,333	0,4210
0,0700	3,015	2,579	1,856	1,258	1,039	0,943	0.872	0,809	0,520	0,455	0,421	0,362	0,4911
0.0800	3,144	2,724	1.943	1,327	1.098	0,995	0.919	0,855	0,554	0.486	0,449	0,387	0,5613
0,0900	3,244	2,847	2,014	1,385	1,148	1,043	0,960	0,894	0,586	0,512	0,475	0,410	0,6314
0,1000	3,322	2,954	2,070	1,435	1,192	1.081	0,994	0,929	0,613	0,536	0,497	0,428	0,7016
0,1250	3,437	3,171	2,162	1,522	1,271	1,152	1,059	0,992	0,665	0.581	0,544	0,470	0,8770
0,1600	3,467	3,370	2,210	1,582	1,330	1,206	1,107	1,038	0,707	0.621	0.582	0,508	1,1226
0,2000	3,412	3,463	2,204	1,602	1,355	1,228	1,126	1,056	0,732	0.646	0.606	0,529	1,4032
0,2500	3,290	3,460	2,160	1,596	1,356	1,231	1,128	1,056	0,745	0.659	0,618	0,540	1.7540
0,3200	3,103	3,371	2,080	1,566	1,337	1,221	1,113	1,040	0,745	0.661	0,621	0,546	2,2451
0.4000	2,908	3.229	1,989	1,516	1,305	1,194	1,088	1,017	0,740	0,658	0,619	0,543	2,8064
0,5000	2,703	3,037	1,890	1,461	1,266	1,162	1,058	0,987	0,730	0.650	0,611	0,539	3,5080
0,6000	2,497	2,812	1,781	1,395	1,215	1,118	1,015	0,946	0,707	0.632	0,596	0,529	4,2096
0,7000	2,321	2,605	1,683	1,329	1,163	1,072	0,971	0,905	0,683	0,611	0,577	0,512	4,9112
0,8000	2,164	2,413	1.594	1,270	1,114	1,031	0,932	0,869	0,660	0,593	0, 39	0,497	5,6128
0,9000	2,031	2,244	1,513	1,214	1,070	0,993	o 896	0,834	0,640	0,575	0,b43	0,484	6,3144
1,0000	1,911	2,092	1,440	1,165	1,028	0,955	o^863	0,802	0,619	0,557	0,527	0,471	7.0160
1,2500	1,665	1,784	1,284	1,053	0,937	0,873	0,787	0,731	0,574	0,517	o 489	0,438	8.7700
1,6000	1,412	1,480	1,116	0,932	0,832	0,778	0,701	0,647	0,519	0,470	o^444	0,398	11,226
2,0000	1,204	1,257	0,972	0,823	0,740	0,694	0,622	0,576	0,467	0,426	0,402	0,363	14,032
2,5000	1 ,019	1,067	0,840	0,721	0,653	0,613	0,548	0,509	0,418	0,380	0,361	0,328	17,540
3,2000	0,843	0,890	0,709	0,617	0,561	0,528	0,474	0,438	0,366	0,335	0,318	o 289	22,451
4,0000	0,708	0,754	0,605	0,532	0,487	0,458	0,413	0,381	0,322	0,295	0,281	0,256	28,064
5,0000	0,593	0,636	0,514	0,455	0,419	0,396	0,357	0,330	0,283	0,258	0,247	0,226	35,080
6,0000	0,513	0,552	0,449	0,400	0,369	0,350	0,316	0,292	0,250	0,231	0,221	0,203	42,096
7,0000	0.453	0,489	0,400	0,358	0,331	0,314	0,284	0,263	0,228	0,209	0,201	0,185	49,112
8,0000	0,407	0,440	0,361	0,325	0,301	0,286	0,260	0,240	0,209	0,192	0,185	0,170	56,128
9,0000	0,370	0,401	0,330	0,298	0,276	0,263	0,239	0,221	0,193	0,178	0,171	0,158	63,144
10,0000	0,340	0,368	0,304	0,276	0,256	0,244	0,222	0,206	0,179	0,166	0,160	0.148	70,160
11,0000	0,315	0,341	0,283	0,257	0,239	0,227	0,207	0,193	0,168	0,157	0,151	0,139	77,176
12,0000	0,293	0,318	0,264	0,241	0,224	0,214	0,195	0,182	0,159	0,148	0,143	0,132	84,192

Продолоюение табл. 42 13

ИэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	АГ	Кг	Хе	Rn	Майлар		Вода	Я. МэВ
0,0125	3,080	1,314	0,871	0.818	0,727	0,480	0,294	0,209	0,138	1,101	1,401	1,069	0,0877
0,0160	3,420	1,442	0,969	0.912	0,810	0.547	0,339	0,242	0,160	1,239	1,576	1,190	0,1123
0,0200	3,719	1,527	1,057	0,995	0,890	0,618	0,385	0,281	0,188	1,373	1,746	1,298	0,1403
0,0250	4,042	1,604	1,152	1,086	0,983	0,705	0.451	0,329	0,238	1.522	1,936	1,415	0,1754
0,0320	4,483	1,701	1,261	1,200	1,097	0.822	0,534	0.402	0,280	1,709	2,180	1,565	0,2245
0,0400	4,904	1,783	1,366	1,315	1,211	0.946	0,627	0.480	0,341	1.896	2,418	1,713	0.2806
0,0500	5.362	1,886	1,489	1,448	1,348	1,087	0,732	0,570	0.413		2,673	1,882	0,3508
0,0600	5,842	1,999	1,621	1,567	1,481	1,219	0,829	0,652	0,479	2',275	2,905	2,043	0,4210
0,0700	6,290	2,130	1,744	1,694	1,607	1,340	0,913	0,726	0,536	2,438	3,110	2,204	0,4911
0,0800	6,742	2.263	1,867	1,815	1,727	1,451	0,995	0,793	0,589	2,588	3.297	2,363	0,5613
0,0900	7.148	2,398	1,983	1,933	1,840	1.552	1,067	0,854	0.632	2,722	3,461	2,513	0,6314
0,1000	7,576	2,542	2,107	2.041	1,942	1,646	1,136	0,905	0,671	2,842	3,614	2,656	0,7016
0,1250	8,581	2.864	2,367	2,280	2,179	1,839	1,267	1,009	0,750	3,100	3,945	2,981	0,8770
0,1600	9,788	3,263	2,678	2,581	2,448	2,039	1,399	1,114	0,826	3,374	4,286	3,381	1,1226
0,2000	10,822	3,593	2,942	2,826	2,671	2,171	1,477	1,173	0,866	3,557	4,514	3,714	1,4032
0,2500	11,707	3,875	3,143	3,026	2,825	2,233	1,510	1,184	0,870	3,659	4,638	3,992	1,7540
0,3200	12,353	4,032	3,280	3,130	2,864	2,194	1,464	1,142	0,834	3,664	4,654	4,155	2,2451
0,4000	12,413	4,098	3.255	3,093	2,801	2,091	1,383	1,076	0.784	3,567	4.542	4,130	2,8064
0,5000	12,058	4,007	3,113	2,862	2,650	1,949	1,285	1,004	0,731		4,326	3,973	3,5080
0,6000	11,310	3,794	2,871	2,729	2,438	1,783	1,183	0,923	0,675	3Л38	4,027	3,681	4,2096
0,7000	10,332	3,551	2,612	2,482	2,221	1,622	1,085	0,845	0,624	2,886	3,709	3,354	4,9112
0,8000	9,356	3.283	2,373	2,263	2,023	1,479	1,001	0,781	0,580	2,652	3,404	3,051	5,6128
0,9000	8,474	3,020	2,164	2,063	1,834	1,353	0,923	0,729	0,542	2,444	3,134	2,775	6,3144
1,0000	7,762	2,807	2,003	1,901	1,693	1,254	0,864	0,688	0,511	2,265	2,902	2,552	7,0160
1,2500	6,382	2,390	1,701	1,624	1,443	1,082	0,760	0,614	0,464	1,922	2,441	2.153	8,7700
1,6000	5,043	1,975	1,426	1.363	1,221	0,932	0,668	0,543	0,421	1,590	1,989	1,772	11,2260
2,0000	4,024	1,649	1,223	1,164	1,054	0,818	0,598	0,491	0,386	1,341	1,652	1,482	14,032
2,5000	3,175	1,365	1,042	0,992	0,915	0,724	0.537	0,448	0,356	1.130	1,368	1,235	17,54
3,2000	2,481	1,102	0,874	0,834	0,775	0,627	0.477	0,397	0,318	0,938	1,118	1,017	22,451
4,0000	1,996	0,902	0,738	0,708	0,665	0,544	0,417	0,351	0,284	0,790	0,931	0,851	**28,064**
5,0000	1.634	0,743	0,621	0,508	0,564	0,467	0,363	0,307	0,252	0,665	0.779	0,713	**35.080**
6,0000	1,396	0,635	0,539	0,519	0,491	0,410	0,320	0,272		0,576	0,673	0,616	42,096
7,0000	1,227	0,557	0,479	0,461	0,436	0,367	0,288	0,246	0^203	0,511	0,595	0,547	49,112
8,0006	1,097	0,496	0.491	0,416	0,393	0,332	0.261	0,224	0,186	0.460	0,534	0,492	56,128
9,0008	0,993	0,451	0,393	0,379	0,359	0,303	0,239	0,206	0,172	0,418	0,485	0,448	63,144
10,0000	0,910	0,415	0,362	0,350	0,331	0,280	0,221	0,190	0,159	0,385	0,445	0,412	70,160
11,0000	0,839	0,385	0,337	0,325	0,307	0,260	0.206	0,177	0,148	0,356	0,412	0,382	77,176
112,0000	0,779	0,359	0.315	0,304	0,287	0,243	0,193	0,166	0,139	0,332	0,384	0,357	84,192

Таблица 42.6. Пробег R, мг/см®, ионов лития в различных веществах fl]
Em — энергия на единицу массы налетающей частицы; ***E*** — полная энергия

МэВ/-. е. м.	Be	C	A1	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	и
0,0125	0,091	0,105	0,149	0.228	0,276	0,320	0,353	0,390	0,614	0,724	0,790	0,937
0,0160	0,108	0,125	0,176	o'268	0,324	0,375	0,411	0.454	0,713	0,840	0,917	1,084
0,0200	0,125	0,145	0,203	0,310	0,374	0,430	0.472	0,519	0,815	0,960	1,047	1,236
0,0250	0,144	0,168	0,234	0,356	0,431	0,493	0,540	0,593	0,930	1,094	1,193	1,407
0,0320	0,167	0,196	0,273	0,414	0,502	0.572	0,625	0,685	1,075	1,263	1,376	1,621
0,0400	0,192	0,225	0,313	0,474	0,575	0,653	0,712	0,779	1,222	1,434	1,562	I 838
0,0500	0,219	0,258	0,358	0,541	0,657	0,743	0,809	0.«84	1,388	1,626	1,770	2^060
0,0600	0,245	0,288	0,399	0,602	0,731	0,825	0,898	0,980	1,538	1,799	1,957	2,298
0,0700	0,269	0,316	0,438	0,660	0,801	0,902		1,070	1,677	1,957	2,129	2,498
0,0800	0,292	0,343	0,475	0,714	0,866	0,974	I ,'060	1,154	1,807	2,107	2,290	2,685
0,0900	0,313	0,368	0,510	0,766	0,929	1,043	1,134	1,235	1,930	2,247	2,442	2,861
0,1000	0,335	0,392	0,545	0,815	0,989	1.109	1,206	1,312	2,047	2,381	2,586	3,029
0,1250	0,387	0,449	0,627	0,934	i;i3i	1,266	1,377	1,494	2,322	2,694	2,923	3,418
0,1600	0,458	0,524	0,739	1,092	1,319	1,473	1,603	1,735	2,679	3,102	3,358	3,919
0,2000	0,539	0,606	0,866	1,268	1,528	1,704	1.854	2,003	3,068	3,544	3,830	4,460
0,2500	0,644	0,708	1,027	1,487	1,786	1,989	2.165	2,334	3,543	4,082	4,402	5,116
0,3200	0,797	0.851	1.259	1,797	2,151	2,389	2,603	2,803	4,202	4,825	5,195	6,020

Продолюжение табл. 42 13

ЙэВ/а.е. м	Be	C	A1	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	и	Е. МэВ
0,4000	0,984	1,021	1,535	2,162	2,576	2,854	3,113	3.349	4,958	5.676	6.101	7.050	2,8064
0,5000	1,235	1,246	1,897	2,633	3,122	3.450	3,767	4,050	5.913	6,749	7.242	8.348	3,5080
а, 6000	1,505	1,486	2,279	3,125	3,688	4,066	4,445	4,776	6,890	7.843	8,405	9.663	4.2096
0,7000	1,796	1,745	2,685	3,641	4,278	4,707	5,151	5,535	7,900	8,972	9,601	11,012	4,9112
0,8000	2,110	2,025	3,113	4,181	4,895	5,374	5,889	6,326	8,945	10,138	10,836	12,403	5,6128
0,9000	2,444	2,327	3,565	4,746	5,538	6,068	6.657	7,151	10,025	11,340	12,109	13,833	6,3144
1,0000	2,801	2,651	4,041	5,336	6,207	6,789	7,455	8,009	11.140	12,580	13,421	15,302	7.0160
1,2500	3,786	3,560	5,333	6,922	7,996	8,712	9,587	10.303	14,085	15,850	16.879	19,170	8.7700
1,6000	5,391	5,076		9,407	10,782	11,699	12.901	13,883	18.595	20,841	22,158	25,061	11,226
2,0000	7,549	7,139	10',092	12,620	14,368	15,528	17.162	18,489	24.312	27,129	28,811	32,461	14,032
2,5000	10,727	10,178	13,986	17,184	19,431	20,921	23,184	24,983	32,273	35,868	38.036	42,665	17,540
3,2000	16,050	15,237	**20,377**	24,576	27,575	29,584	32,858	35.424	44,873	49,681	52,588	58,696	22,451
4,0000	23,345	22,115	**28,980**	34,412	38,347	41,030	45,590	49,207	61,270	67,597	71.426	79.418	28,064
5,0000	34,219	32,291	41,612	48,725	53,931	57,561	63,935	69,066	84,591	93,110	98,124	108.717	35.080
6,0000	46,969	44,168	56,261	65,202	71,805	76.461	84.889	91,721	111,029	121,911	128.197	141,553	42,096
7,0000	61,546	57,693	72,863	83,772	91,915	97,648	108.335	117,065	140.460	153,864	161.529	177,795	49,112
8,0000	77,913	72,827	91,364	104,373	114,191	121.081	134,173	145,010	172,689	188,866	197,979	217.365	56,128
9,0000	96,006	89,546	111,719	126,952	138,567	146,699	162,344	175,480	207,690	226,803	237.462	260.122	63,144
10,0000	115,792	107,830	133,888	151,447	165,005	174,444	192,836	208,369	245,422	267,589	279,846	305.969	70,160
11,0000	137,251	127,647	157,836	177,806	193,446	204.266	225,596	243,585	285.804	311,088	324,942	354.839	77,176
12,0000	160,349	148,972	183,531	206,012	223,836	236,107	260,555	281.068	328,736	357,218	372,746	406.695	84.192

Е МэВ/а.е. м	н	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CHr)_n$	Вода	я. МэВ
0,0125	0,034	0,087	0,130	0,138	0,156	0.245	0,421	0,618	0.961	0,103	0,080	0,101	0,0877
0,0160	0,041	0,104	0,155	0,165	0,186	0.290	0.496	0.720	1.116	0,123	0,096	0,121	0,1123
0,0200	0,049	0,123	0,182	0,193	0,217	0,336	0.568	0,823	1,269	0,144	0,112	0,143	0,1403
0,0250	0,057	0,145	0,213	0,226	0,253	0.387	0.649	0,934	1,429	0,167	0,130	0,168	0,1754
0,0320	0,068	0,174	0,252	0,268	0,299	0.450	0,746	1,065	1,613	0,197	0,154	0,200	0,2245
0,0400	0,080	0,205	0,294	0,311	0,347	0,512	0,841	1,190	1,791	0.227	0.178	0,234	0,2806
0,0500	0,094	0,243	0,343	0,361	0,401	0.580	0,943	1.322	1,975	0.262	0,205	0.272	0,3508
0,0600	0,106	0,279	0,387	0,407	0,450	0.641	1,031	1.436	2,131	0.294	0,230	0,307	0,4210
0,0700	0,117	0,312	0,428	0,450	0,495	0.695	1,112	1.538	2,269	0.324	0,253	0.340	0,4911
0,0800	0,128	0,344	0,467	0,490	0,537	0.746	1,186	1.630	2,394	0,352	0,275	0.371	0.5613
0,0900	0,138	0,375	0,504	0,527	0,576	0.792	1,254	1.715	2.509	0,378	0,296	0.400	0,6314
0,1000	0,148	0,403	0,538	0,563	0,613	0,836	1.317	1,795	2,616	0,403	0.316	0.427	0,7016
0,1250	0,170	0,468	0,616	0,644	0,698	0,937	1.463	1,978	2,863	0,462	0.362	0.489	0,8770
0,1600	0,196	0,548	0,714	0,745	0,804	1.063	1.647	2,209	3,174	0,538	0.422	0.566	1,1226
0,2000	0,223	0,630	0,813	0,849	0,914	1.196	1,842	2,454	3,505	0,619	0.485	0.645	1,4032
0,2500	0,255	0,724	0,929	0,968	1,041	1.356	2,077	2,752	3,909	0,716	0,562	0,736	1,7540
0,3200	0,295	0,848	1,081	1,128	1,214	1,577	2,407	3,174	4,485	0,850	0,668	0,857	2,2451
0,4000	0,341	0,986	1,253	1,308	1,412	1.839	2,802	3,681	5,179	1,005	0,790	0,992	2,8064
0,5000	0,398	1,159	1,474	1,540	1,670	2.187	3,328	4,356	6,107	1,207	0,948	1.165	3,5080
0,6000	0,458	1,339	1,709	1,787	1,946	2.564	3,898	5,086	7,106	1,422	1,116	1.349	4,2096
0,7000	0,523	1,530	1,965	2,057	2,248	2.977	4,517	5,881	8,187	1.656	1.298	1,549	4,9112
0,8000	0,595	1,736	2,247	2,353	2,579	3,430	5,191	6,745	9,353	1,909	1,495	1,768	5,6128
0,9000	0,673	1,959	2,557	2,678	2,943	3.926	5,921	7.675	10,605	2,185	1.710	2,009	6,3144
1,0000	0,760	2,200	2,894	3,032	3,341	4.465	6,707	8.665	11,939	2,483	1,943	2,273	7,0160
1,2500	1,010	2,878	3,846	4,032	4,466	5,973	8.875	11,368	15,547	3,326	2,603	3,023	8,7700
1,6000	1,444	4,012	5,427	5,687	6,321	8,425	12.328	15,631	21,12C	4,735	3,721	4,284	11,226
2,0000	2,069	5,572	7,558	7,921	8,802	11,647	16,779	21,076	28.09S	6,662	5.274	6,021	14,032
2,5000	3,054	7,918	10,676	11,195	12,385	16,217	22,983	28,577	37,581	9,520	7,615	8,623	17,540
3,2000	4,813	11,941	15,843	16,617	18,240	23,531	32.713	40.266	52,215	14,311	11,604	13,025	22,451
4,0000	7,346	17,591	22,858	23,948	26,085	33,168	45.333	55.339	70.92S	20,856	17,126	19,081	28,064
5,0000	11,247	26,198	33,261	34,774	37,585	47,133	63,413	76,781	97,236	30,575	25,40a	28,122	35,080
6,0000	15,906	36,449	45,413	47,403	50,952	63.203	84.029	101,111	126,825	41,941	35,125	38,735	42,096
7,0000	21,280	48,275	59,249	61,771	66,134	81.327	107.149	128,256	159,727	54.896	46,236	50,849	49.112
8,0000	27,336	61,640	74,712	77,803	83,100	101.469	132,756	158,192	195.85C	69.390	58.701	64,398	56,128
9,0000	34,066	76,482	91,774	95,480	101,800	123,606	160,869	190,942	235,18C	85,406	72.497	79.365	63,144
10,0000	41,456	92,705	110,387	114,758	122,176	147,702	191,404	226,468	277,697	102,917	87.604	95,720	70,160
11,0000	49,492	110,269	130,495	135,582	144,187	173,733	224,299	264,722	323,396	121.886	103,99C	113,420	77,176
12,0000	58,174	129,156	152,070	157,926	167,804	201,663	259,498	305,639	372.24C	142,288	121.63S	132,440	84,192

б л и ц а 42.7. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг-см-2), для йог |Be+ [1]

E_n — энергия на единицу массы налетающей частицы; E — полная энергия

E МэВ/а.е.м.	Бе	с	Al	Ti	Ni	Се	Zc	Ag	EU	Та	Аи	и	E, МэВ
0,0125	1,800	1,489	1,091	0,725	0,589	0,534	0,495	0,458	0,291	0.249	0,229	0,196	0,1127
0,0160	2,036	1,684	1,234	0,821	0,666	0,605	0,560	0,518	0,329	0.282	0,259	0,222	0.1442
0,0200	2,276	1,883	1,380	0,917	0,745	0,676	0,626	0,579	0.368	0.315	0,290	0,248	0.1802
0:0250	2,545	2,105	1,542	1,026	0,833	0,756	0,700	0,648	0.412	0.352	0,325	0,278	0,2253
0,0320	2,876	2,384	1,745	1,160	0,944	0,859	0,792	0,733	0.466	0.400	0,368	0,316	0,2884
0,0400	3,199	2,664	1,946	1,298	1,058	**0,965**	0,889	0,823	0.523	0.450	0,414	0,356	0,3605
0,0500	3,538	2,966	2,160	1,447	1,186	**1,080**	0,996	0,922	0.585	0,509	0,469	0,403	0,4506
0,0600	3,820	3.233	2,341	1,578	1,297	1,177	1,088	1,009	0,646	0,562	0,518	0,446	0,5407
0,0700	4,050	3,465	2,493	1,690	1,396	1,266	1,171	1,087	0,698	0,611	0,566	0,486	0,6309
0,0800	4,236	3,670	2,618	1,788	1,479	1,340	1,238	1,152	0,746	0,654	0,605	0,521	0,7210
0,0900	4,381	3,846	2,720	1,871	1,550	1.409	1,297	1,208	0,791	0,692	0,642	0,553	0,8111
0,1000	4,494	3,996	2,800	1,940	1,613	1,462	1,344	1,257	0,829	0,725	0,672	0,580	0,9012
0,1250	4,653	4,293	2,926	2,060	1,721	1,560	1,434	1,343	0,900	0,787	0,736	0,636	1,1265
0,1600	4,692	4,561	2,991	2,141	1,800	1,633	1,498	1,406	0,957	0,840	0,788	0.688	1,4420
0,2000	4,633	4,702	2,993	2,176	1,841	1,667	1,529	1,434	0,994	0,877	0,823	0,718	1,8024
0,2500	4,508	4,742	2,960	2,187	1,859	1,687	1,545	1,447	1,021	0,903	0,847	0,740	2,2530
0.3200	4,327	4,701	2,900	2,184	1,865	1,702	1,551	1,450	1,038	0,922	0,866	0,761	2,8839
0,4000	4,142	4,598	2,833	2,159	1,859	1,700	1,550	1,448	1,054	0,938	0,881	0,773	3,6049
0,5000	3.947	4.435	2,760	2,133	1,849	1,697	1,546	1,441	1,065	0,949	0,893	0,787	4,5061
0,6000	3.734	4,205	2,663	2,085	1,816	1,673	1,518	1,414	1.057	0,945	0,891	0,791	5,4073
0,7000	3.547	3,981	2,572	2,032	1,777	1,638	1,484	1,384	1,044	0,934	0,882	0,782	6,3085
0,8000	3.374	3,762	2.485	1,980	1,737	1,608	1,453	1.354	1,029	0,924	0,872	0,775	7,2098
0,9000	3,222	3,560	2,401	1,925	1.697	1,575	1,421	1.323	1,015	0,912	0,862	0,768	8,1110
1,0000	3,079	3,371	2,320	1,877	1,656	1,538	1,390	1,292	0,998	0,898	0,849	0,759	9,0122
1,2500	2,766	2,962	2,132	1,749	1.557	1,450	1,307	1,213	0,953	0,859	0,812	0,727	11,265
1,6000	2,410	2,526	1,904	1,590	1,420	1,327	1,195	1,104	0,885	0.801	0,758	0.680	14,420
2,0000	2,091	2,183	1,688	1,430	1,285	1,205	1.080	1,001	0,810	0.739	0,699	0.630	18,024
2,5000	1,789	1,875	1,475	1,267	1.146	1.077	0.963	о 894	0,735	0.668	0,634	0,575	22,530
3,2000	1,4-jl	1,575	1,254	1,091	0.993	0,934	0,838	0,'775	0,647	0,592	0,562	0,510	28,839
4,0000	1,256	1,337	1,073	0,943	0,864	0.814	0.733	0.676	0.572	0,524	0,499	0,454	36,049
5,0000	1,053	1,129	0,913	0,809	0,745	0,703	0.633	0,586	0,502	0,458	0,439	0,401	45,061
6,0000	0,912	0,980	0,797	0,711	0,656	0,622	0.561	0,519	0,445	0,410	0,393	0,361	54,073
7,0000	0,804	о 869	0,709	0,635	0,587	0,558	0,505	0,467	0,404	0,372	0,357	0,328	63,085
8,0000	0,721	0',781	0,640	0,576	0,533	0,507	0,461	0,426	0,370	0,341	0,328	0,302	72,098
9,0000	0,656	0,710	0,584	0,528	0,489	0,466	0,424	0,392	0,342	0,316	0,303	0,280	81,110
10,0000	0,602	0,651	0,538	0,488	0,452	0,431	0,392	0,364	0,318	0,295	0.284	0,262	90,122
11,0000	0,557	0,603	0.500	0,455	0.422	0,402	0,366	0,341	0,298	0,277	0,267	0,246	99,134
12,0000	0,519	0,562	0.467	0,426	0,395	0,378	0,344	0,321	0,281	0,261	0,252	0,232	108,15

МэВ/а.е. м.	и	Не	N	1 **1** о	Ne	Ar	Kr	Хе	Rn	Майлар	(CH,)^	Вода	E, МэВ
0,0125	4,090	1,745	1,156	1,086	0.965	0,637	0,390	0,277	0,183	1.463	1,861	1,420	0,1127
0,0160	4.541	1,915	1,287	1,210	1.076	0,727	0,450	0,321	0,213	1,645	2,093	1,581	0,1442
0,0200	4,939	2,028	1,403	1,322	1.182	0,821	0,512	0,372	0,249	1,824	2,319	1,723	0,1802
0,0250	5,367	2,130	1,530	1,442	1,305	0,936	0,598	0,436	0,316	2,020	2,571	1,879	0,2253
0,0320	5,950	2,258	1,673	**1**,593	1,455	1,091	0,708	0,534	0,372	2,268	2,893	2,077	0,2884
0,0400	6,518	2,370	1,815	1,747	1,609	1,257	0,833	0,638	0,453	2,520	3,214	2,276	0,3605
0,0500	7,150	2,514	1,985	1,931	1,797	1,449	0,976	0,760	0,551	2,795	3.564	2,510	0,4506
0,0600	7,818	2,676	2,170	2,097	1,983	1,632	1,110	0,873	0,641	3,045	3,888	2,734	0,5407
0,0700	8,450	2,861	2,343	2,276	2,159	1,800	1,226	0,975	0,720	3,275	4,177	2,961	0,6309
0,0800	9,084	3.050	2,516	2,445	2,327	1,956	1,340	1,068	0,793	3.487	4,443	3,183	0,7210
0,0900	9,655	3,239	2,679	2,611	2,486	2,097	1,441	1,153	0,854	3,677	4,675	3,394	0,8111
0,1000	10,248	3,438	2,850	2,761	2,626	2,226	1,537	1,224	0,907	3,844	4,889	3,592	0,9012
0,1250	11,618	3.877	3,204	3,087	2.950	2,490	1,715	1,367	1,015	4,196	5,341	4,035	1,1265
0,1600	13,248	4,417	3,625	3.493	3.314	2,760	1,893	1,507	1,118	4,567	5,802	4,576	1,4420
0,2000	14,694	4,878	3,995	3,837	3,627	2,948	2,005	1,592	1,176	4,830	6,129	5,043	1,8024
0,2500	16,043	5,310	4,307	4,147	3,872	3,061	2,069	1,622	1,193	5,014	6,355	5.470	2,2530
0,3200	17,225	5,623	4,573	4,364	3,993	3,059	2,041	1.592	1.163	5,109	6,490	5.794	2.8839
0.4000	17,679	5,836	4,635	4,405	3 989	2,978	1,969	1,533	1.116	5,080	6,468	5,882	3.6049
0,5000	17,609	5,851	4,546	4.325	3'.870	2,846	1,877	1,466	1.068	4.949	6,318	5,802	4,5061
0,6000	16,912	5,673	4,293	4.080	3,646	2,666	1,768	1,380	1.009	4,693	6,022	5,505	5.4073
0,7000	15,792	5,427	3.992	3.794	3.395	2,479	1,659	1,291	0,954	4,411	5,669	5,126	6,3085

Продолюоение табл. 42 13

МэВ/а: е. м	H	He	N	O	Ne	Ar	Кг	Xe	Rn	МаНлар	$(C_1Ь)_n$	Вода	*E*, МчВ
0,8000	14,584	5,118	3,700	3,528	3,153	2,306	1,560	1,217	0,904	4,134	5,307	4,755	7,2098
0,9000	13,444	4,792	3,433	3,272	2,910	2,146	1,464	1,157	0,859	3,877	4,972	4,403	8,1110
1,0000	12,505	4,522	3,227	3,062	2,728	2,021	1,392	1,109	0,824	3,649	4,675	4,111	9,0122
1,2500	10,598	3,968	2,825	2,697	2,397	1,798	1,262	1,019	0,770	3,192	4,054	3,576	11,265
1,6000	8,604	3,369	2,433	2,326	2,083	1,590	1,140	0,927	0,7!8	2.713	3,394	3,023	14,420
2,0000		2,865	2,123	2,022	1,830	1,421	1,038	0,852	0,670	2,329	2,870	2,574	18,024
2,5000	5,'577	2,397	1,831	1,742	1,608	1,272	0,944	0,786	0,626	1,986	2,403	2,169	22,530
3,2000	4,390	1,950	1,546	1,476	1,371	1,110	0,844	0,702	0,563	1,659	1,978	1,800	28,839
4,0000	3,542	1,601	1,309	1,256	1,181	0,966	0,741	0,624	0,504	1,402	1,652	1,510	36,049
5,0000	2,903	1,319	1,104	1,062	1,001	0,830	0,645	0,545	0,447	1,181	1,383	1,267	45,061
6,0000	2,478	1,127	0,958	0,921	0,873	0,728	0,569	0,484	0,398	1,023	1,194	1,094	54,073
7,0000	2,177	0,988	0,849	0,819	0,774	0,651	0,512	0,437	0,361	0,907	1,056	0,970	63,085
8,0000	1,946	0,880	0,765	0,738	0,697	0,588	0,463	0,397	0,330	0,815	0,947	0,872	72,098
9,0000	1,759	0,799	0,696	0,672	0,636	0,538	0,424	0,364	0,304	0,741	0,860	0,793	81,110
10,0000	1,610	0,735	0,641	0,619	0,586	0,495	0,391	0,336	0,282	0,681	0,788	0,729	90,122
11,0000	1,484	0,681	0,595	0,575	0,544	0,460	0,364	0,313	0,262	0,630	0,729	0,676	99,134
12,0000	1,377	0,634	0,556	0,537	0,508	0,429	0,341	0,294	0,246	0,587	0,678	0,630	108,15

Таблица 42.8. Пробег R, мг/см^, ионов бериллия |Be+ в различных веществах [1]
— энергия на единицу массы налетающей частицы; ***E*** — полная энергия

E МэВ/а.е. м	Бе	С	Аı	Ti	Ni	Ge	Zt	Ag	Еш	•ба	Au	и	£, МэВ
0,0125	0,085	0,097	0,137	0,210	0,252	0,295	0,325	0,360	0,566	0,669	0,730	0,868	0,1127
0,0160	0,101	0,116	0,163	0,248	0,298	0,346	0,381	0,421	0,660	0,779	0,850	1,009	0,1448
0,0200	0,117	0,136	0,189	0,287	0,346	0,400	0,438	0,483	0,758	0,893	0,974	1,154	0,1802
0,0250	0,135	0,157	0,219	0,332	0,400	0,460	0,503	0,554	0,868	1,022	1,114	1,318	0,2253
0,0320	0,158	0,185	0,256	0,388	0,469	0,536	0,585	0,642	1,006	1,183	1,289	1,522	0,2884
0,0400	0,182	0,213	0,295	0,445	0,539	0,613	0,669	0,733	1,148	1,348	1,468	1,731	0,3605
0,0500	0,208	0,245	0,338	0,510	0,617	0,699	0,762	0,834	1,307	1,532	1,667	1,963	0,4506
0,0600	0,233	0,273	0,378	0,568	0,689	0,778	0,848	0,926	1,451	1 ,697	1,847	2,172	0,5407
0,0700	0,256	0,300	0,414	0,623	0,754	0,851	0,926	1,011	1,583	1,849	2,011	2,362	0,6309
0,0800	0,277	0,325	0,450	0,675	0,816	0,920	1,001	1,091	1,706	1,989	2,163	2,539	0,7210
0,0900	0,298	0,349	0,483	0,724	0,876	0,986	1,072	1,168	1,823	2,123	2,307	2,707	0,8111
0,1000	0,319	0,372	0,516	0,771	0,933	1,048	1,140	1,241	1,935	2,250	2,444	2,866	0,9012
0,1250	0,368	0,427	0,595	0,884	1,068	1,197	1,302	1,414	2,195	2,548	2,764	3,236	1,1265
0,1600	0,435	0,498	0,701	1,033	1,246	1,394	1,517	1,643	2,534	2,934	3,177	3,711	1,4420
0,2000	0,512	0,575	0,821	1,200	1,444	1,612	1,755	1,896	2,903	3,354	3,624	4,224	1,8024
0,2500	0,611	0,671	0,973	1,407	1,688	1,881	2,048	2,209	3,350	3,860	4,163	4,841	2,2530
0,3200	0,754	0,804	1,188	1,695	2,027	2,253	2,455	2,644	3,963	4,551	4,900	5,682	2,8839
0,4000	0,924	0,960	1,440	2,027	2,414	2,677	2,920	3,142	4,652	5,326	5,726	6,621	3,6049
0,5000	1,147	1,159	1,762	2,447	2,900	3,208	3,503	3,766	5,503	6,282	6,742	7,777	4,5061
0,6000	1,382	1,368	2,094	2,875	3,392	3,743	4,091	4,398	6,352	7,233	7,753	8,919	5,4073
0,7000	1,629	1,588	2,439	3,313	3,894	4,287	4,691	5,042	7,209	8,192	8,769	10,065	6,3085
0,8000	1,890	1,821	2,795	3,762	4,407	4,842	5,305	5,700	8,079	9,162	9,797	11,223	7,2098
0,9000	2,!63	2,067	3,164	4,223	4,931	5,409	5,932	6,374	8,961	10,144	10,836	12,391	8,1110
1,0000	2,450	2,328	3,546	4,698	5,469	5,988	6,573	7,063	9,856	11,140	11,890	13,571	9,0122
1,2500	3,222	3,041	4,560	5,942	6,872	7,497	8,246	8,863	12,167	13,705	14,603	16,605	11,265
1,6000	4,445	4,196	6,127	7,835	8,996	9,773	10,771	11,590	15,603	17,508	18,625	21,095	14,420
2,0000	6,054	5,734	8,141	10,230	11,668	12,627	13,947	15,024	19,865	22,196	23,585	26,611	18,024
2,5000	8,389	7,967	11,003	13,584	15,389	16,590	18,373	19,796	25,715	28,618	30,364	34,110	22,530
3,2000	12,265	11,650	15,656	16,967	21,320	22 898	25,417	27,399	34,890	38,676	40,960	45,783	28,839
4,0000	17,552	16,634	21,891	26,095	29,126	31,193	34,644	37,388	46,773	51,660	54,612	60,800	36,049
5,0000	25,417	23,996	31,029	36,449	40,399	43,152	47,914	51,753	63,643	70,115	73,925	81,994	45,061
6,0000	34,639	32,586	41,624	48,366	53,326	56,820	63,069	68,138	82,764	90,945	95,675	105,743	54,073
7,0000	45,188	42,373	53,637	61,803	67,878	72,152	80,035	86,477	104,061	114,067	119,795	131,968	63,085
8,0000	57,040	53,333	67,036	76,722	84,010	89,122	98,746	106,715	127,401	139,416	146,192	160,624	72,098
9,0000	70,155	65,451	81,789	93,088	101,678	107,691	119,165	128,800	152,770	166,913	174,809	191,616	81,110
10,0000	84,508	78,716	97,872	110,858	120,858	127,818	141,286	152,660	180,143	196,501	205,557	224,876	90,122
11,0000	100,089	93,104	115,259	129,997	141,508	149,471	165,072	178,229	209,464	228,085	238,300	260,359	99,134
12,0000	116,873	108,600	133,931	150,492	163,592	172,608	190,475	205,467	240,660	261,605	273,037	298,040	108,15

Продолюение табл. 42 13

МэВ/а.е. м.	и	Не	N	O	Ne	Ar	Кг	Хе	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	
0,0125	0,031	0,081	0,120	0,127	0,143	0,224	0,385	0,566	0,883	0,095	0,074	0,093	0,1127
0,0160	0,038	0,097	0,144	0,153	0,171	0,267	0,454	0,663	1,030	0,114	0,089	0,112	0,1442
0,0200	0,045	0,115	0,169	0,180	0,201	0,311	0,524	0,761	1,176	0,134	0,105	0,133	0,1802
0,0250	0,054	0,136	0,199	0,211	0,236	0,360	0,601	0,867	1,328	0,156	0,122	0,157	0,2253
0,0320	0,064	0,164	0,237	0,251	0,280	0,420	0,695	0,993	1,505	0,185	0,145	0,188	0,2884
0,0400	0,076	0,194	0,277	0,293	0,326	0,480	0,786	1,113	1,676	0,215	0,168	0,220	0,3605
0,0500	0,089	0,231	0,324	0,341	0,378	0,545	0,884	1,240	1,852	0,248	0,194	0,257	0,4506
0,0600	0,100	0,265	0,366	0,385	0,425	0,603	0,969	1,349	2,002	0,278	0,218	0,291	0,5407
0,0700	0,111	0,297	0,406	0,426	0,468	0,655	1,045	1,446	2,134	0,307	0,240	0,322	0,6309
0,0800	0,122	0,328	0,443	0,464	0,508	0,703	1,115	1,535	2,253	0,333	0,261	0,351	0,7210
0,0900	0,131	0,356	0,478	0,500	0,545	0,748	1,180	1,616	2,363	0,359	0,281	0,379	**0,8111**
0,1000	0,140	0,383	0,510	0,533	0,580	0,789	1,241	1,691	2,465	0,382	0,300	0,405	0,9012
0,1250	0,161	0,445	0,584	0,610	0,661	0,885	1,379	1,865	2,699	0,438	0,344	0,464	1,1265
0,1600	0,186	0,521	0,677	0,706	0,762	1,005	1,554	2,084	2,994	0,510	0,400	0,537	1,4420
0,2000	0,212	0,598	0,771	0,804	0,866	1,131	1,739	2,317	3,308	0,587	0,461	0,612	I,8024
0,2500	0,241	0,687	0,880	0,917	0,986	1,281	1,960	2,597	3,688	0,678	0,533	0,697	2,2530
0,3200	0,279	0,802	1,022	1,065	1,146	1,487	2,267	2,990	4,224	0,803	0,631	0,809	2,8839
0,4000	0,320	0,928	1,179	1,230	1,327	1,726	2,626	3,451	4,857	0,945	0,742	0,933	3,6049
0,5000	0,372	1,082	1,375	1,436	1,556	2,036	3,095	4,053	5,683	1,124	0,883	1,087	4,5061
0,6000	0,424	1,239	1,579	1,651	1,796	2,363	3,590	4,687	6,551	1,311	1,030	1,247	5,4073
0,7000	0,479	1,401	1,797	1,880	2,052	2,713	4,116	5,362	7,469	1,510	1,184	1,416	6,3085
0,8000	0,538	1,572	2,031	2,126	2,328	3,090	4,676	6,081	8,439	1,721	1,348	1,599	7,2098
0,9000	0,603	1,754	2,284	2,392	2,625	3,496	5,273	6,840	9,462	1,946	1,524	1,796	**8,1110**
1,0000	0,672	1,948	2,555	2,676	2,945	3,928	5,904	7,636	10,533	2,185	1,711	2,008	9,0122
1,2500	0,868	2,480	3,302	3,461	3,827	5,111	7,605	9,756	13,363	2,846	2,229	2,596	II,265
1,6000	1,199	3,344	4,506	4,722	5,241	6,980	10,236	13,004	17,610	3,919	3,080	3,557	14,420
2,0000	1,665	4,506	6,095	6,387	7,090	9,381	13,554	17,063	22,813	5,356	4,238	4,851	18,024
2,5000	2,389	6,230	8,386	8,793	9,723	12,739	18,113	22,575	29,781	7,456	5,958	6,763	22,530
3,2000	3,669	9,159	12,148	12,740	13,986	18,065	25,198	31,087	40,437	10,944	8,862	9,968	28,839
4,0000	5,505	13,254	17,232	18,053	19,672	25,049	34,344	42,011	53,999	15,688	12,866	14,357	36,049
5,0000	8,327	19,481	24,757	25,884	27,991	35,151	47,423	57,521	73,030	22,718	18,851	20,897	45,061
6,0000	11,697	26,894	33,547	35,019	37,658	46,774	62,333	75,117	94,429	30,939	25,883	28,573	54,073
7,0000	15,585	35,452	43,558	45,415	48,644	59,889	79,063	94,761	118,238	40,313	33,924	37,339	63,085
8,0000	19,971	45,131	54,756	57,026	60,931	74,476	97,607	116,440	144,404	50,810	42,950	47,151	72,098
9,0000	24,849	50,888	67,123	69,839	74,485	90,521	117,984	140,178	172,912	62,418	52,950	58,000	81,110
10,0000	30,210	67,658	80,627	83,823	89,267	108,002	140,136	165,950	203,749	75,122	63,909	69,865	90,122
t 1,0000	36,045	80.410	95,226	98,943	105,248	126,901	164,020	193,726	236,932	88,895	75,807	82,716	99,134
12,0000	42,353	94,135	110,904	115,180	122,410	147,197	189,598	223,458	272,429	103,720	88,631	196,537	108,15

Таблица 42.9. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг-см-2), для ионов m — энергия на единицу массы налетающей частицы; ***E*** — полная энергия

ЛгэВ/а.е. м.	Be	C	Ат	Ti	Ni	Ge	Zc	Ag	Eu	Ta	Au	и	***E***, MsB
0,0125	2,222	1,838	1,347	0,896	0,727	0,660	0,611	0,566	0,360	0,308	0,283	0,242	0,1376
0,0160	2,514	2,080	1,524	1,013	0,823	0,747	0,692	0,640	0,407	0,348	0,320	0,274	0,1761
0,0200	2,811	2,325	1,703	1,133	0,920	0,835	0,773	0,715	0,455	0,389	0,358	0,307	0,2202
0,0250	3,142	2,600	1,904	1,266	1,028	0,933	0,865	0,800	0,508	0,435	0,401	0,343	0,2752
0,0320	3,551	2,943	2,155	1,433	1,166	1,060	0,978	0,905	0,575	0,493	0,455	0,390	0,3523
0,0400	3,940	3,281	2,397	1,599	1,304	1,189	1,095	1,014	0,645	0,555	0,510	0,439	0,4404
0,0500	4,341	3,638	2,650	1,776	1,455	1,325	1,222	1,132	0,718	0,624	0,575	0,494	0,5504
0,0600	4,668	3,950	2,860	1,928	1,584	1,439	1,330	1,233	0,789	0,686	0,634	0,545	0,6605
0,0700	4,932	4,218	3,035	2,058	1,700	1,542	1,426	1,323	0,850	0,744	0,689	0,592	0,7706
0,0800	5,145	4,458	3,180	2,172	1,797	1,628	1,504	1,399	0,906	0,795	0,735	0,633	0,8807
0,0900	5,317	4,667	3,300	2,271	1,881	1,710	1,574	1,465	0,960	0,840	0,779	0,672	0,9900
0,1000	5,457	4,852	3,400	2,356	1,958	1,775	1,632	1,527	1,006	0,881	0,816	0,704	1,1076
0,1250	5,689	5,249	3,578	2,519	2,104	1,907	1,753	1,642	1,100	0,963	0,900	0,778	1,3761
0,1600	5,830	5,667	3,716	2,661	2.237	2,029	1,862	1,746	1,189	1,044	0,979	0,855	1,7614
0,2000	5,861	5,948	3,786	2,753	2,329	2,109	1,935	1,814	1,257	1,109	1,041	0,909	2,2018
0,2500	5,806	6,108	3,813	2,817	2,394	2,173	1,990	1,864	1,315	1,163	1.090	0,953	2,7521
0,3200	5,672	6,163	3,802	2,863	2,445	2,232	2,034	1,901	1,361	1,209	1,135	0,998	3,5229

Продолжение табл. 42.9

E МэВ/а .е. м.	Be	**C**	A1	Ti	Ni	Ge	Zc	Ag	Eu	Ta	Au	и	*E.* МэБ
0,4000	5,506	6.112	3,766	2,870	2,470	2,260	2,060	1,924	1,401	1,247	1,171	1,028	4,4036
0,5000	5,309	5,966	3,713	2,870	2,487	2,283	2,079		1,433	1,277	1,201	1,058	5,5045
0,6000	5,091	5,733	3,631	2,843	2,476	2,280	2,070	!!928	1,442	1,289	1,215	1,078	6,6054
0,7000	4,894	5,494	3,549	2,804	2,452	2,261	2,048	1,909	1,441	1.288	1,217	1,079	7,7063
0,8000	4,707	5,248	3,466	2,762	2,423	2,243	2,028	1,889	1,435	1,289	1,217	1,081	8,8072
0,9000	4,540	5,017	3,383	2,713	2.392	2,219	2,003	1,864	1,431	1.286	1,214	1,083	9,9081
1,0000	4,379	4,795	3,300	2,670	2,356	2,188	1,977	1,838	1,419	1,277	1,208	1,079	11,009
1,2500	4,015	4,300	3,096	2,538	2,260	2,105	1,898	1,761	1,384	1,248	1,179	1,056	13,761
1,6000	3,577	3,749	2,825	2,359	2,108	1,969	1,774	1,639	1,314	1,190	1,125	1,009	17,614
2,0000	3,159	3,297	2,550	2,160	1,941	1,821	1,632	1,512	1,224	1,117	1,056	0,951	22,018
2,5000	2.741	2,872	2,260	1.941	1,756	1,650	1,476	1,369	1.125	1.024	0,972	0.881	27,522
3,2000	2,309	2,439	1,942	1,689	1,538	1,447	1,297	1,200	1,002	0,916	0,870	0,790	35,229
4,0000	1,955	2,082	1,671	1,469	1,345	1,267	1,141	1,053	0.891	0,816	0,777	0,707	44,036
5,0000	1,644	1,763	1,425	1,263	1,163	1,097	0,989	0,915	0,784	0,715	0,685	0,626	55,045
6,0000	1,424	1,531	1,245	1,110	1,024	0,971	0,876	0,810	0,694	0,641	0,614	0,564	66,054
7,0000	1,255	1.356	1,107	0,992	0,916	0,871	0,788	0,729	0,631	0,580	0,557	0,512	77,033
8,0000	1.125	1.218	0,998	0.898	0.831	0.791	0,719	0,664	0.577	0,532	0,511	0,471	88,072
9,0000	1,022	1,106	0,910	0,822	0,762	0,725	0,660	0,611	0,532	0,492	0,472	0,437	99,081
10,0000	0,936	1,013	0,838	0,760	0,704	0,671	0,611	0,567	0,494	0,458	0,441	0,408	110,09
11,0000	0,865	0,937	0,776	0,706	0,655	0,625	0,569	0,530	0,463	0,430	0,415	0,383	121,10
12,0000	0,804	0,871	0,724	0,660	0,613	0,586	0,534	0,498	0,435	0,405	0,391	0,361	132,11

МэВ/^е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH2)_n$	Вода	*E.* МэБ
0,0125	5.050	2.155	1,427	1.341	1,192	0,786	0,482	0,342	0.226	1,806	2,297	1.753	0,1376
0,0160	5,607	2,365	1,589	1.495	1.329	0,897	0,556	0,396	0,263	2,031	2,584	1,952	0,1761
0,0200	6,098	2,504	1.732	1,632	1,460	1,014	0,632	0,460	0,308	2,252	2,863	2,128	0,2202
0,0250	6,628	2,630	1,889	1,781	1,611	1,156	0,739	0,539	0,390	2,495	3,175	2,320	0,2752
0,0320	7,347	2,788	2,066	1,967	1,797	1,347	0,875	0,659	0,459	2,801	3,572	2,564	0,3523
0,0400	8,029	2,919	2,236	2,152	1,982	1,548	1,026	0,786	0,558	3,104	3,959	2,804	0,4404
0,0500	8,772	3,085	2,435	2,369	2,205	1,778	1,198	0,933	0,676	3.429	4,373	3,079	0,5504
0,0600	9,553	3,269	2,651	2,563	2,423	1,993	1,356	1.067	0,784	3,721	4.751	3.341	0,6605
0,0700	10,288	3,484	2,853	2,771	2,628	2,191	1,493	1,187	0,877			3,605	0,7706
0,0800	11,035	3,705	2,056	2,970	2,827	2,376	1,628	1,297	0,964	4.'236	51397	3,867	0,8807
0,0900	11,717	3,931	3,251	3,168	3,017	2,545	1,749	1,399	1,036	4,462	5.674	4,119	0,9908
0,1000	12,444	4,175	3,461	3,352	3,189	2,703	1,867	1,486	1,102	4,668	5,936	4,362	1,1009
0,1250	14,206	4,741	3,918	3,775	3,607	3,045	2,097	1,671	1,242	5,131	6,530	4,934	1,3761
0,1600	16,461	5,488	4,504	4,340	4,117	3,430	2,352	1,873	1,390	5,674	7,209	5,685	1,7614
0,2000	18,590	6,172	5,055	4,854	4,589	3,729	2,537	2,014	1,488	6,111	7,754	6,380	2,2018
0,2500	20,664	6,840	5,547	5,341	4,987	3,942	2,665	2,089	1,536	6,458	8,185	7,046	2,7522
0,3200	22,583	7,372	5,995	5,722	5,235	4,011	2,676	2,087	1,525	6,699	8,508	7,596	3,5229
0,4000	23.499	7,758	6,161	5,856	5,302	3,958	2,617	2,037	1,484	6,752	8.598	7,818	4,4036
0,5000	23,686	7,871	6,115	5,818	5,205	3,828	2,525	1,971	1,437	6,657	8,498	7,804	5,5045
0,6000	23,057	7.734	5,853	5,563	4,971	3,635	2,411	1,881	1,376	6,398	8,210	7,505	6,6054
0,7000	21,790	7,488	5,508	5,235	4,684	3,421	2,289	1,782	1,317	6,086	7,822	7,073	7,7063
0,8000	20,346	7,140	5,161	4,922	4,398	3,216	2,177	1,698	1,262	5,767	7,403	6,634	8,8072
0,9000	18,945	6,752	4,838	4,611	4,100	3,024	2,064	1,631	1,211	5,463	7,006	6,204	9,9081
1,0000	17,787	6,432	4,590	4,356	3.881	2,874	1,980	1,577	1,171	5,191	6,649	5,848	11,009
1,2500	15,386	5,761	4,102	3,916	3,480	2,610	1,833	1,480	I, H 8	4,634	5,885	5,191	13,761
1,6000	12,771	5,001	3,611	3,453	3,091	2,359	1,692	1,376	1,065	4,026	5,038	4,487	17,614
2,0000	10,557	4,327	3,208	3,055	2,764	2,147	1,568	1,288	1,012	3,519	4,335		22,018
2,5000	8,542	3,672	2,805	2,669	2,463	1,948	1,446	1,205	0,958	3,042	3,681	3,'322	27,522
3,2000	6,796	3,019	2,394	2,285	2,122	1,718	1,307	1,087	0,872	2,569	3,062	2,786	35.229
4,0000	5,515	2,493	2,039	1,955	1,838	1,504	1,153	0,971	0,785	2,182	2,572	2,351	44,036
5,0000	4,532	2,059	1,723	1,659	1,563	1,295	1,007	0,851	0,698	1,844	2,159	1,978	55,045
6,0000	3,871	1,760	1,496	1,439	1,363	1,138	0,889	0,755	0,622	1,598	1,866	1,709	66,054
7,0000	3,398	1,543	1,326	1,278	1,209	1,016	0,799	0,682	0,563	1,416	1,648	1,514	77,063
8,0000	3,034	1,373	1,193	1,151	1,087	0,917	0,722	0,619	0,514	1,272	1,477	1,361	88,072
9,0000	2,740	1,245	1,084	1.047	0,990	0,837	0,660	0,567	0,473	1,154	1,339	1,235	99,081
10,0000	2,504	1,143	0,997	0,963	0,911	0,771	0,609	0,523	0,438	1,059	1,226	1,134	110,09
11,0000	2,306	1,057	0,925	0,893	0,845	0,714	0,566	0,487	0,408	0,979	1,133	1,050	121,10
12.0000	2,136	0,984	0,862	0,833	0,788	0,666	0,529	0,455	0,382	0,911	1,052	0,977	132,11

Таблица 42.10. Пробег R, мг/см^, ионов бора '5B+ в различных веществах [I]
E_n — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

MэB/a.e.M.	Be	C	Ат	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	и	E. МэВ
0,0125	0,082	0,093	0,130	0,199	0,237	0,278	0,307	0,341	0,535	0,633	0,691	0,824	0,1376
0,0160	0,097	0,111	0,155	0,236	0,282	0,329	0,361	0,400	0,627	0,740	0^808	0,961	0,1761
0,0200	0,113	0,130	0,181	0,274	0,329	0,381	0,418	0,461	0,722	0,851	0,929	1,103	0,2202
0,0250	0,131	0,152	0,210	0,318	0,382	0,440	0,481	0,530	0,829	0,977	1,065	1,263	0,2752
0,0320	0,154	0,179	0,247	0,373	0,449	0,514	0,562	0,617	0,965	1,135	1,237	1,463	0,3523
0,0400	0,177	0,206	0,285	0,429	0,517	0,590	0,644	0,706	1,104	1,297	1,413	1,668	0,4404
0,0500	0,203	0,238	0,328	0,493	0.595	0,676	0,737	0,806	1,261	1,478	1,610	1,898	0,5504
0,0600	0,227	0,266	0,367	0,551	0.666	0,754	0,821	0,897	1.404	1,643	1,788	2,105	0,6605
0,0700	0,250	0,293	0,404	0,606	0.732	0,827	0,900	0.982	1,536	1,794	1,951	2,295	0,7706
0,0800	0,272	0,318	0,439	0,657	0.794	0,895	0,974	1,062	1,659	1,935	2,103	2,472	0,8807
0,0900	0,293	0,342	0,473	0,707	0,854	0,961	1,045	1,139	1,776	2,069	2,246	2,649	0,9908
0,1000	0,313	0,365	0,506	0.754	0,911	1,024	1,114	1.212	1,887	2,197	2,384	2,800	1,1009
0,1250	0,363	0.420	0,585	0,867	1,046	1,173	1,276	1,386	2,148	2,495	2,705	3.172	1,3761
0,1600	0,429	0,490	0,690	1,015	1,223	1,369	1,489	1,613	2,485	2,879	3,115	3,643	1,7614
0,2000	0,505	0,566	0,808	1,178	1,416	1,582	1,721	1,860	2,844	3,288	3,550	4,142	2,2018
0,2500	0,599	0,657	0.952	1,375	1.649	1,838	2,001	2 Л 59	3,272	3.772	4,066	4,733	2,7522
0,3200	0,733	0,783	1,155	1,647	1,967	2,188	2,384	2,568	3,847	4.421	4,758	5,522	3,5229
0,4000	0,891	0,926	1,387	1,954	2,326	2,580	2,814	3,028	4,485	5,138	5,522	6,391	4,4036
0,5000	1,094	1,109	1,682	2,337	2,770	3,065	3.346	3,598	5,262	6,011	6,450	7,447	5,5045
0,6000	1,306	1,297	1,981	2,723	3·213	3,547	3,877	4,168	6,028	6,869	7,361	8,477	6,6054
0,7000	1,527	1,493	2,288	3,113	3,660	4,032	4,411	4,742	6,792	7,723	8,267	9,498	7,7063
0,8000	1,756		2,602	3,508	4,112	4,521	4,952	5,321	7,557	8,577	9,171	10,517	8,8072
0,9000	1,994	i;913	2,924	3,910	4,569	5,014	5,498	5,908;	8,325	9,432	10,077	11,534	9,9081
1,0000	2,241	2,137	3,253	4,319	5,033	5,514	6,051	6,503!	9,09r	10,291	10,986	12,553	11,009
1,2500		2,743	4,114	5,377	6,225	6,796	7.472	8,032	11,061	12,471	13,291	15,131	13,761
1,6000	3^915	3,703	5.417	6,951	7,991	8,689	9.572	10,300	13,919	15,634	16,637	18,864	17,614
2,0000	5,226	4,957	7,059	8,903	10,169	11,016	12,161	13,099	17,393	19,455	20,680	23,361	22,018
2,5000	7,099	6,749	9,355	11,595	13,155	14,196	15.713	16,929	22,088	24,609	26,120	29,379	27,522
3,2000	10,171	9,668	13,044	15,861	17,856	19,196	21,296	22,955	29,361	32,581	34,519	38,631	35,229
4,0000	14,329	13,588	17,947	21,467	23,995	25,719	28,553	30,811	38,706	42,792	45,256	50,442	44,036
5,0000	20,491	19,355	25,105	29,577	32,825	35,087	38,947	42,063	51,920	57,249	60,384	67,044	55,045
6,0000	27,704	26,073	33,392	38,899	42,937	45,778	50,801	54,880	66,877	73,542	77,396	85,620	66,054
7,0000	35,955	33,730	42,790	49*410	54,320	57,772	64,073	69,225	83,536	91,629	96,264	106,135	77,063
8,0000	45,234	42,310	53,279	61,090	66,950	71,057	78,722	85,069	101,808	113,474	116,930	128,568	88,072
9,0000	55,513	51,808	64,842	73,916	80,797	85,610	94,725	102,378	121,692	133,025	139,359	152,858	99,081
10,0000	66,777	62,217	77,463	87,862	95,849	101,406	112,085	121,103	143,173	156,245	163,489	178,960	110,09
11,0000	79,021	73,524	91,128	102,902	112,077	118,422	130,777	141,196	166,215	181,065	189,220	206,844	121,10
12,0000	92,230	85,719	105,822	119,031	129,455	136,629	150,768	162,63!	190,765	207,444	216.556	236.498	132.11

E MэВ/a.e.м.	H	He	N	C	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E. МэВ
0,0125	0,030	0,077	0,113	0,120	0,135	0,211	0,362	0,533	0,832	• 0,090	0,070	0,088	0,1376
0,0160	0,036	0,093	0,137	0,145	0,162	0,253	0,429	0,627	0,974	0,109	0,085	0,107	0,1761
0,0200	0,043	0,110	0,162	0,171	0,192	0,295	0,497	0,722	1,116	0,128	0,100	0,127	0,2202
0,0250	0,052	0,131	0,191	0,202	0,226	0,343	0,572	0,825	1,265	0,150	0,118	0,150	0,2752
0,0320	0,062	0,159 •	0,228	0,242	0,269	0,402	0,664	0,949	1,438	0,179	0,140	0,181	0,3523
0,0400	0,073	0,189	0,268	0,283	0,314	0,461	0,754	1,067	1,606	0,208	0,163	0,213	0,4404
0,0500	0,086	0,225	0,314	0,331	0,365	0,526	0,850	1,192	1,780	0,241	0,189	0,249	0,5504
0,0600	0,098	0,259	0,356	0,374	0,412	0,584	0,935	1,300	1,929	0,271	0,212	0,283	0,6605
0,0700	0,109	0,291	0,396	0,415	0,455	0,636	1,011	1,397	2,060	0,299	0,235	0,314	0,7706
0,0800	0,119	0,321	0,432	0,453	0,495	0,684	1,082	1,485	2,179	0,326	0,256	0,343	0,8807
0,0900	0,129	0,350	0,467	0,489	0,533	0,728	1,147	1,567	2,289	0,351	0,275	0,371	0,9908
0,1000	0,138	0,377	0,500	0,523	0,568	0,770	1,208	1,643	2,392	0,376	0,294	0,397	1,100!)
0,1250	0,158	0,439	0,575	0,600	0,649	0,866	1,347	1,818	2,627	0,432	0,339	0,456	1,3761
0,1600	0,184	0,514	0,666	0,695	0,749	0,985	1,520	2,035	2,920	0,503	0,395	0,528	1,7614
0,2000	0,209	0,590	0,758	0,790	0,850	1,108	1,700	2,261	3,226	0,578	0,453	0,601	2,2018
0,2500	0,237	0,674	0,862	0,898	0,965	1,251	1,911	2,530	3,589	0,665	0,522	0,683	2,7522
0,3200	0,272	0,783	0,996	1,038	1,115	1,445	2,199	2,898	4,092	0,782	0,615	0,789	3,5229
0,4000	0,311		1,141	1,190	1,283	1,666	2,532	3,325	4,678	0,913	0,718	0,903	4,4036
0,5000	0,357	Ь040	1,320	1,378	1.492	1,949	2,960	3,875	5.432	1,077	0,846	1,044	5,5045

МэВ/а.е.м. Майлар

0,6000	0,404	1, 181	1,504	1,572	1,709	2,244	3,407	4,44€	6,215	1,246	0,978	1,188	6,6054
0,7000	0,453	1,326	1,698	1,776	1,937	2,556	3,875	5,048	7,033	1,422	1,116	1,339	7,7063
0,8000	0,506	1,476	1,904	1,993	2,179		4,36S	5,681	7,887	1,608	1, 260	1,500	8,8072
0,9000	0,562	1,635	2,125	2,224	2,438	3',241	4,888	6,345	8,777	1,804	1,413	1,671	9,9081
1,0000	0,622	1, 802	2,358	2,470	2,714	3,615	5,433	7,02€	9,702	2, 011	1,574	1,854	11,009
1,2500	0,788	2,254	2.993	3.136	3.464	4.620	6.877	8,83C	12,107	2,572	2,014	2,354	13,761
1,6000	1,063	2,973	3.994	4,184	4,639	6,173	9,066	11,531	15,638	3,465	2,723	3,152	17,614
2,0000	1,443	3,920		5.542	6,147	8,131	11,77C	14,84C	19,879	4,636	3,666	4,208	**22,018**
2,5000	2,024	5,303	7,'127	7,472	8,259	**10,826**	15,429	19,265	25,472	6,321	5,046	5,742	27,522
3,2000	3,039	7,625	**10, 110**	10,601	11,638	15,047	21,045	**26, 010**	33,918	9,086	7,348	**8,282**	35,229
4,0000	4,482	10,845	14,108	14,780	**16, 110**	20,540	28,238	34,601	44,585	12,816	10,497	11,734	44,036
5,0000		15,722	**20,002**	20,914	**22,626**	28,453	38,482	46,751	59,491	18,323	15,185	16,857	55,045
6,0000	9^329	21,521	26,877	28,058	30,188	37,544	50,145	60,514	76,320	24,753	20,685	**22,861**	66,054
7,0000	12,370	**28,216**	34,709	36,191	38,782	47,803	63,232	75,881	94,854	32,087	26,976	29,718	77,063
8,0000	15,804	35,793	43,476	45,28]	48,401	59,223	77,750	92,852	115,339	40,304	34,042	37,400	88,072
9,0000	19,627	44,224	53,168	55,323	59,024	71,798	93,721	111,457	137,682	49,402	41,879	45,902	99,081
10,0000	23,834	53,460	63,765	66,298	70,624	85,517	111,105	131,683	161,883	59,372	50,480	55,213	110.09
11,0000	28,420	63,482	75.238	78,180	83,183	100,369	129,874	153,51C	187,959	70;195	59,830	65,313	121.10
12,0000	33,384	74,283	87,576	90,957		116,341	150,003	176,908	215,894	81,862	69,922	76,189	132,11

Таб. ица 42.11. Массовая тормозная способность веществ, **МэВ/(мг–см–2),** для ионов углерода [1]

Ет — энергия на единицу массы падающей частицы; *Е* — полная энергия

МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	и	
0,0125	2,558	2,116	1,550	1,031	0,837	0,760	0,704	0,651	0,414	0,354	0,326	0,279	0,1500
0, 0160	2,894	2,394	1,754	1,166	0,947	0,859	0.796	0,737	0,468	0,401	0,368	0,316	0,1920
0,0200	3,236	2,677	1,961	1,304	1,059	0,961	0,890	0,824	0,524	0,448	0,412	0,353	0,2400
0,0250	3,618	2,993	2,192	1,458	1,184	1,074	0,995	0,921	0,585	0,501	0,462	0,395	0,3000
0,0320	4,088	3,388	2,481	1,650	1,342	1,220	1,126	1,042	0,662	0,568	0,523	0,449	0,3840
0,0400	4,559	3,797	2,773	1,850	1,509	1,376	1,267	1,173	0,746	0,642	0,591	0,508	0,4800
0,0500	5,042	4,226	3,078	2,062	1,690	1,539	1,419	1,314	0,834	0,725	0,668	0,574	0,6000
0,0600	5,455	4,616	3,342	2.253	1,852	1,681	1,554	1,441	0,922	0,802	0,740	0,637	0,7200
0,0700	5,806	4,967	3,573	2,423	2,001	1,815	1,679	1,558	1,000	0,875	0,811	0,697	0,8400
0,0800	6,108	5,293	3,775	2,578	2,133	1,933	1,786	1,661	1,076	0,944	0,872	0,751	0,9600
0,0900	6,365	5,587	3,951	2,718	2,252	2,047	1,885	1,754	1,150	1,006	0,932	0,804	1,0800
0,1000	6,587	5,856	4,104	2,844	2,364	2,142	1,970	1,843	1,215	1,063	0,985	0,850	1,2000
0,1250	6,991	6,450	4,397	3,095	2,585	2,344	2,155	2,018	1,352	1,183	1,106	**0,956**	1,5000
0,1600	7,286	7,082	4,644	3,325	2,796	2,536	2,327	2,183	1,486	1,305	1,224	**1,068**	1,9200
0,2000	7,407	7,518	4,785	3,479	2,943	2,665	2,445	2,292	1,589	**1,402**	**1,316**	1,148	2,4000
O,2500	7,402	7,786	4,860	3,592	3,052	2,770	2,537	2,377	1,677	**1,482**	**1,390**	1,215	3,0000
0,3200	7,294	7,925	4,889	3,681	3,144	2,870	2,616	2,444	1,750	1,555	1,459	1,283	3,8400
0,4000	7,140	7,926	4,884	3,721	3,204	2,930	2,671	2,496	1,817	1,617	1,519	1,333	4,8000
0,5000	6,950	7,810	4,860	3,757	3,256	2,989	2,722	2,537	1,876	1,672	1,572	1,385	6,0000
0,6000	6,692	7,537	4,773	3,738	3,255	2,998	2,721	2,535	1,895	1,695	1,597	1,418	7,2000
0,7000	6,456	7,247	4,682	3,698	3,235	2,982	2,701	2,519	1,901	1,699	1,606	1,423	8,4000
0,8000	6,229	6,944	4,587	3,655	3,206	2,967	2,683	2,500	1,899	1,706	1,610	1,431	9,6000
0,9000	6,025	6,658	4,490	3,601	3,174	2,945	2,658	2,474	1,899	1,706	1,612	1,437	10.800
1,0000	5,828	6,382	4,392	3,553	3,136	2,912	2,631	2,446		1,700	1,607	1,436	12. 000
1,2500	5,382	5,764	4,150	3,403	3,029	2,822	2,544	2,361	1^855	1,672	1,581	1,415	15,000
1,6000	4,844	5,077	3,826	3,195	2,854	2,667	2,403	2,219	1,779	1,611	1,523	1,366	19,200
2,0000	4.327	4,515	3,492	2,958	2,657	2,493	2,235	2,071	1,676	1,529	1,446	1,303	24,000
2,5000	3,799	3,981	3,132	2,690	2,434	2,286	2,045	1,898	1,560	1,419	1,347	**1,222**	30,000
3,2000	3.240	3,423	2,725	2,371	2,158	2,030	1,820	1,684	1,406	1,286	1,221	1,109	38,400
4,0000	2,770	2,950	2,368	2,081	1,906	1,795	1,617	1,492	1,262	1,156	1,101	1,002	48,000
5,0000	2,347	2,516	2,034	**1**,802	1,660	1,566	1,412	1,306	1,119	1,021	0,978	0,893	60,000
6,0000	2,041	2,194	1,784	1,591	1,468	1,392	1,256	**1**,161	0,995	0,919	0,880	0,808	72,000
7,0000	1,804	**1**,948	1,590	1,425	1,317	1,252	1,132	1,048	0,907	0,833	0,800	0,736	84,000
8,0000	1.619	1,752	1,436	1,293	1,196	1,137	1,034	0,955	0,830	0,766	0,735	0,678	96,000
9,0000	I ,472	1,592	1,310	1,183	1,097	1,044	0,950	0,879	0,767	0,708		0,629	108,00
10,0000	1 ,348	1,459	1,206	1,094	1,013	0,966	0,879	0,816	0,712	0,660	0',636	0,587	120, 00
11,0000	1,245	1,349	1,118	1,017	0,943	0,900	0,819	0,763	0,666	0,619		0,551	132,00
12,0000	1,158	1,254	1,042	0,950	0,883	0,843	0,768	0,717	0,626	0,584	0^563	0,519	144,03

Продолюение табл. 42 13

н	He	N	O	Ne	Ar	Кг	Xe	Rn	Майлар	(CHO„	Вода	*Е,* МэВ
5,814	2,481	1,643	1,544	1,372	**0,905**	0,555	0,394	0,260	2,079	2,645	2,019	0,1500
6,455	2.722	1,829	1,721	1,529	**1,033**	0,640	0,456	0,303	2,338	2,975	2,247	0,1920
7,020	2,883	1,994	1,879	1,681	1,167	0,728	0,529	0,354	2,592	3,296	2,449	0,2400
7,630	3,028	2.175	2,050	1.855	1,331	0,851	0,620	0,449	2,872	3,655	2,670	0,3000
8,459	3,210	2,379	2,265	2,069	1,550	1,007	0,759	0,528	3,225	4.113	2,952	0,3840
9,291	3,378	2,587	2,490	2,294	1,792	1,187	0,910	0,646	3,591	4,582	3,245	0,4800
10,188	3,583	2,829	2,752	2,561	2,065	1,391	1,083	0,785	3,983	5,079	3,577	0,6000
11,163	3,820	3,098	2,995	2,831	2,330	1,584	1,247	0,916	4,348	5,551	3,904	0,7200
12,113	4,102	3,359	3,262	3.094	2,580	1,758	1.397	1,033	4,695	5,989	4,245	0,8400
13,100	4,398	3,628	3,526	3,356	2,820	1,933	1,540	1,144	5,028	6.406	4,591	0,9600
14,027	4,706	3,892	3,793	3,611	3,046	2,094	1,675	1,241	5,342	6,792	4,931	**1,0800**
15,021	5,040	4,178	4,047	3,850	3,263	2,253	1,793	1,330	5,635	7,166	5,265	**1,2000**
17,456	5,826	4,815	4,639	4,432	3,742	2,577	2,053	1,526	6,305	8,024	6,063	1,5000
20,573	6,859	5,628	5,424	5,146	4,286	2,940	2,341	1,737	7,091	9,009	7,105	1,9200
23,495	7,800	6,388	6,135	5,800	4,713	3,206	2,546	1,881	7,723	9,800	8,063	2,4000
26,341	8,719	7,071	6.809	6,357	5,025	3,397	2,663	1,959	8,233	10,434	8,981	3,0000
29,040	9,480	7,710	7,358	6.732	5,158	3,442	2.684	1,960	8,614	10,941	9.768	3,8400
30,475	10,061	7,990	7,594	6,876	5,133	3,394	2,642	1,924	8,757	11,150	10,139	4,8000
31,007	10,303	8,004	7,616	6,814	5,011	3,305	2,581	1,881	8,714	11,125	10,216	6,0000
30,311	10,167	7,695	7,313	6,535	4,778	3,170	2,473	1,809	8,411	10,793	9,867	7,2000
28,745	9,878	7,266	6,905	6,180	4,513	3,020	2.350	1,737	8,029	10,318	9,330	8,4000
26,923	9.448	6,829	6,513	5,820	4,256	2,880	2,247	1,669	7,632	9,797	8,779	9,6000
25,142	8,961	6,420	6,119	5,441	4,014	2,739	2,164	1,607	7,251	9.298	8,234	10,800
23,673	8,560	6,109	5,797	5,165	3,825	2,635	2,099	1,559	6,909	8,850	7.783	12,000
20,623	7,722	5,498	5,249	4,664	3,498	2,457	1,984	1,498	6,212	7,888	6,959	15,000
17,295	6.773	4,890	4,676	4,186	3,195	2,292	1,863	1,443	5,452	6,822	6,076	19,200
14,457	5,926	4,393	4,183	3,785	2,940	2,148	1,763	1,386	4,819	5,936	5.325	24,000
11,839	5,090	3,887	3,699	3,414	2,700	2,005	1,669	1,328	4,216	5.102	4,604	30,000
9,538	4,238	3,360	3,208	2,979	2,412	1,834	1,526	1,224	3,605	4,298	3,911	38,400
7,814	3,533		2,770	2,605	2,131	1,634	1,376	1,113	3,093	3.644	3,332	48,000
6,468	2,939	2,'459	2,368	2,231	1,849	1,438	1,214	0,997	2,632	3,081	2,823	60,000
5,548	2,523	2,144	2,062	1,953	1,631	1,274	1,083	0,892	2,291	2,674	2,449	72.000
4,883	2,217	1,905	1,837	1,737	1,460	1,148	0,980	0,810	2,034	2,368	2,176	84 000
4,366	1,975	1,716	1,656	1,564	1,320	1,038	0,890	0,740	1,830	2,126	1,958	96,000
3,945	1,793	1,561	1,507	1,426	1,206	0,950	0,816	0,681	1,662	1,928	1,778	108,00
3,606	1,646	1,436	1,387	1,312	1,110	0,877	0,754	0,631	1,524	1,766	1,633	120,00
3,320	1,522	1,331	1,285	1,216	1,028	0,815	0,701	0,587	1,409	1,631	1,511	132,00
3.074	1.416	1.241	1,198	1.134	0,959	0,762	0,656	0.549	1,311	1.514	1.407	144,00

Таблица 42.12. Пробег R, мг/см®, ионов углерода в различных веществах [1]
— энергия на единицу массы падающей частицы; *Е* — полная энергия

МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	7л	Ag	EU	Та	Au	и	*Е,* МэВ
0,0125	0,075	0,085	0,119	0,181	0,216	0,255	0,282	0,313	0,491	0,581	0,635	0,758	0,1500
0,0160		0,102	0,143	0,216	0,258	0,302	0.332	0,368	0,576	0,681	0,744	0,886	0,1920
0,0200	0,'l04	0,120	0,167	0,252	0,302	0,350	0,385	0,425	0,665	0,785	0,857	1,019	0,2400
0,0250	0,121	0,140	0,194	0,293	0,351	0,406	0.444	0,490	0,766	0,903	0,985	1,169	0,3000
0,0320	0,143	0.165	0,229	0,345	0,414	0,476	0,520	0,572	0,893	1,051	1,146	1,357	0,3940
0,0400	0,164	0,191	0,264	0,398	0,478	0,547	0,597	0,655	1,024	1,203	1,311	1,549	0,4800
0,0500	0,189	0,221	0,304	0,457	0,551	0,627	0,684	0,749	1,171	1,373	1,495	1,764	0,6000
0,0600	0,212	0,247	0,341	0,512	0,617	0,700	0,763	0,834	1,304	1,526	1,661	1,957	0,7200
0,0700	0,233	0,272	0,375	0,562	0,678	0,767	0,836	0,913	1,426	1,666	1,812	2,133	0,8400
0,0800	0,253	0,296	0,408	0,609	0,735	0,830	0,904	0.986	1,539	1,795	1,952	2,295	0,9600
0,0900	0,272	0,318	0,439	0,655	0,789	0,891	0,968	1,056	1,645	1,916	2,083	2,447	1,0800
0,1000	0,291	0,339	0,468		0,841	0,948	1,030	1,123	1,747	2.032	2,208	2,592	1,2000
0,1250	0,335	0,387	0,539	ОДЭ9	0,962	1,082	1,176	1,278	1,981	2,299	2,494	2,925	1,5000
0,1600	0,394	0,449	0,631	0,929	1,118	1,253	1,363	1,478	2,276	2.636	2,854	3,339	1,9200
0,2000	0,459	0,515	0,733	1,070	1,285	1,438	1,564	1,692	2,588	2,991	3,232	3,771	2,4000
0,2500	0,540	0,593	0,857	1,240	1,485	1,658	1,804	1,949	2,955	3,406	3,675	4,279	3,0000
0,3200	0,654	0,700	1,030	1.471	1,756	1,956	2,130	2,297	3.445	3,959	4,264	4,951	3,8400
0,4000	0,787	0,821	1,226	1,730	2,058	2,287	2,493	2,685	3.983	4,564	4,909	5,684	4,8000

Продолюоение табл. 42 13

	Be	C	A!	Ti	Ni	Ge	Zr	*Ag*	Eu	Ta	Au	и	*E*, МэВ
0,5000	0,957	0,974	1,472	2,051	2,429	2,692	2,938	3,162	4,633	5,294	5,685	6,567	6,0000
0,6000	1,133	1,130	1,721	2,371	2,798	3,093	3,379	3,635	5,269	6,007	6,442	7,423	7,2000
0,7000	1,316	1,292	1,975	2,694	3,168	3,494	3,821	4,110	5,901	6,714	7,192	8,268	8,4000
0,8000	1,505	1,462	2,234	3,020	3,540	3,898	4,267	4,589	6,533	7,419	7,938	9,109	9,6000
0,9000	1,701	1,638	2,498	3,351	3,916	4,303	4,716	5,071	7,165	8,122	8,683	9,946	10,800
1,0000	1,903	1,822	2,769	3,686	4,297	4,713	5,170	5,559	7,798	8,827	9,428	10,781	12,000
I,2500	2,439	2,317	3,471	4,549	5,270	5,760	6,330	6,807	9,401	10,605	11,310	12,885	15,000
1,6000	3,262	3,094	4,526	5,823	6,698	7,291	8,029	8,642	11,713	13,164	14,016	15,905	19,200
2,0000	4,311	4,097	5,840	7,385	8,442	9,153	10,101	10,882	14,493	16,223	17,252	19,504	24,000
2.5000	5,793	5.514	7,656	9,514	10,803	П;668	12,910	13,911	18,206	20,299	21,555	24,264	30,000
3,2000	8,193	7,795	10,537	12,846	14,476	15,574	17,271	18,6(8	23,888	26,527	28,116	31,492	38,400
4,0000	11,405	10,823	14,325	17,178	19,219	20,614	22,878	24,678	31,108	34,416	36.411	40,617	48,000
5,0000	16,125	15,240	19,809	23,391	25,984	27,791	30,841	33,308	41,232	45,491	48,001	53,336	60,000
6,0000	21.621	20,359	26,)23	30,493	33.687	35,936	39,873	43.073	52,627	57,905	60,963	67,489	72,000
7,0000	27,887	26,173	33,259	38,475	42,332	45,044	49,951	53,967	65,278	71,640	75,291	83,068	84,000
8,0000	34,921	32,678	41,210	47,329	51,905	55.114	61,055	65,977	79,129	86,683	90,956	100,073	96,000
9,0000	42,705	39,870	49,967	57,042	62,392	66,136	73,175	79,085	94,186	103,004	107,942	118,468	108,00
10,0000	51,232	47,750	59,521	67,599	73,786	78.093	86,316	93,260	110,448	120,581	126,208	138,227	120.00
11,0000	60,500	56,310	69,865	78,984	86,071	90,974	100,466	108,470	127,890	139,370	145,686	159,335	132,00
12,0000	70,501	65,543	80,991	91,197	99,229	104,760	115,603	124,700	146,479	159,344	166,385	181,788	144,00

E МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	*AT*	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	£, МэВ
0,0125	0,027	0,070	0,103	0,109	0,122	0,192	0,330	0,487	0,762	0,082	0,064	0,080	0,1500
0,0160	0,033	0,085	0,125	0,133	0,148	0,231	0,392	0.574	0,894	0,100	0,078	0,097	0,1920
0,0200	0,040	0,102	0,148	0,157	0,176	0,271	0,456	0,663	1,026	0,118	0,092	0,116	0,2400
0,0250	0,048	0,121	0,175	0,186	0,207	0,315	0,526	0,760	1,166	0,139	0,108	0,138	0,3000
0,0320	0,057	0,147	0,210	0,223	0,248	0,371	0,612	0,876	1,329	0,165	0,129	0,167	0,3840
0,0400	0,068	0,175	0,248	0,262	0,290	0,426	0,696	0,987	1,486	0,192	0,151	0,197	0,4800
0,0500	0,080	0,209	0,291	0,306	0,338	0,487	0,787	1,104	1,649	0,223	0,175	0,231	0,6000
0,0600	0,091	0,241	0,330	0,347	0,382	0,541	0,866	1,205	1,788	0,252	0,197	0,262	0,7200
0,0700	0,101	0,270	0,367	0,385	0,422	0,589	0,936	1,294	1,909	0,278	0,218	0,291	0,8400
0,0800	0,110	0,298	0,401	0,420	0,458	0,633	1,000	1,376	2,018	0,302	0,237	0,318	0,9600
0,0900	0.119	0,325	0,433	0,452	0,493	0,673	1,060	1,451	2,120	0,325	0,255	0,343	1,0800
0,1000	0,127	0,349	0,463	0,483	0,525	0,711	1,115	1,520	2,213	0,347	0,273	0,367	1,2000
0,1250	0,146	0,405	0,529	0,552	0,597	0,797	1,239	1,676	2,424	0,397	0,312	0,420	1,5000
0,1600	0,168	0,471	0,610	0,636	0,685	0,902	1,392	1,867	2,681	0,460	0,361	0,483	1,9200
0,2000	0,190	0,536	0,690	0,719	0,773	1,008	1,548	2,063	2,946	0,525	0,412	0,547	2,4000
0,2500	0,214	0,609	0,779	0,811	0,871	1,131	1,729	2,293	3,258	0,600	0,471	0,617	3,0000
0,3200	0,244	0,701	0,892	0,930	1,000	1,296	1,975	2,607	3,686	0,700	0,550	0,707	3,8400
0,4000	0,276	0,799	1,015	1,058	1,141	1,483	2,256	2,968	4,181	0,810	0,637	0,803	4,8000
0,5000	0,315	0,917	1,165	1,216	1,316	1,719	2,614	3,427	4,811	0,947	0,745	0,921	6,0000
0,6000	0,354	1,035	1,318	1,377	1,496	1,965	2,984	3,902	5,462	1,088	0,854	1,041	7,2000
0,7000	0,395	1,154	1,478	1,546	1,685	2,223	3,372	4,400	6,139	1,234	0,968	1,166	8,4000
0,8000	0,438	1,278	1,648	1,725	1,885	2,497	3,779	4,922	6,843	1,387	1,087	1,298	9,6000
0,9000	0,484	1,409	1,830	1,915	2,098	2,787	4.206	5,466	7,576	1,548	1,213	1,439	10,800
1,0000	0,534	1,546	2,021	2,116	2,324	3,093	4,653	6,029	8,334	1,718	1,345	1,589	12,000
1,2500	0,669	1,915	2,539	2,660	2.936	3,913	5,832	7,499	10,297	2,176	1,704	1,997	15,000
1,6000	0,892	2,496	3,349	3,508	3,887	5,170	7,603	9,684	13,153	2,898	2,277	2,643	19,200
2,0000	1,196	3,254	4,386	4,594	5,093	6,737	9,767	12,333	16,548	3,835	3.032	3,488	24,000
2,5000	1,655	4.348	5,839	6,121	6,764	8,868	12,661	15,831	20,971	5,168	4,124	4,701	30,000
3,2000	2,448	6,162	8,169	8,565	9,404	12,166	17,048	21,102	27,570	7,327	5,922	6,685	38,400
4,0000	3,563	8,650	11,258	11,794	12,858	16,410	22,605	27,739	35,811	10,210	8,354	9,352	48,000
5,0000	5,256	12,386	15,774	16,493	17,850	22,472	30,454	37,047	47,231	14,429	11,946	13,277	60,000
6,0000	7,265	16,804	21,011	21,936	23,611	29,398	39,339	47,534	59,984	19,327	16,136	17,851	72,000
7,0000	9.574		26,959	28,113	30,138	37,189	49,278	59,203	74,127	24,896	20,914	23,058	84,000
8,0000	12,177	27,'631	33,604	35,003	37,429	45,845	60.283	72,068	89,655	31,125	26,270	28,881	96,000
9,0000	15,072	34,016	40,944	42,607	45,474	55,369	72,377	86,157	106,576	38,015	32.205	35,320	108,00
10,0000	18,257	41,008	48,966	50,915	54,255	65,754	85,537	101,468	124,896	45,562	38,716	42,369	120,00
11,0000	21,728	98,594	57,651	59,910	63,763	76,997	99,745	117,991	144,635	53,755	45,793	50,014	132,00
12,0000	25,487	56,772	66,993	69,585	73,989	89,090	114,986	135,707	165,787	62,589	53,435	58,249	144,00

Таблица 42.13. Массовая тормозная способность веществ, AISB/CMF-CM-^), ДЛЯ ИОНОВ азота [1]

Ет — энергия на единицу ма-сы падающей частицы; *Е* — полная энергия

МэВ/а. е. м-	Be	с	Ai	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	и	г. МэВ
0,0125	2,972	2,458	1,801	1,198	0,973	0,882	0,818	0,756	0,481	0.412	0,378	0,324	0,1750
0,0160	3,362	2,781	2,038	1,355	1,100	0,998	6,925	0,856	0,544	0,466	0,428	0,367	0,2240
0,0200	3,759	3,110	2,278	1,515	1,250	1,116	1,034	0,957	0,608	0.521	0,478	0,410	0,2801
0,0250	4,202	3,477	2,547	1,694	1,375	1,248	1,156	1,070	0,680	0,582	0,536	0,458	0,3501
0,0320	4,749		2,881	1,916	1,559	1,418	1,308	1,210	0,769	0,660	0,608	0,522	0,4481
0,0400	5,296	4,'410	3,222	2,149	1,753	1,598	1,472	1,363	0,867	0.746	0,686	0,590	0,5601
0,0500	5,843		3,567	2,3S0	1,958	1,784	1,644	1,523	0,967	0,840	0,774	0,665	0,7001
0,0600	6,306	5'337	3,864	2,604	2,141	1,944	1,797	1,665	1,067	0.927	0,856	0,736	0,8402
0,0700	6,700	5,731	4,123	2,795	2,S09	2,094	1,938	1,798	1,154	1,010	0,936	0,804	0,9802
0,0800	7,038	6,099	4,350	2,971	2,458	2,227	2,058	1,914	1,240	1,088	),005	0,866	1,1202
0,0900	7,331	6,435	4,551	3,131	2,594	2,357	2,171	2,020	1,324	1,158	1,074	0,926	1,2603
0,1000	7,589	6,748	4,729	3,277	2,724	2,468	2,270	2,123	1,400	1,225	1,135	0,979	1,4003
0,1250	8,096	7,470	5,092	3,585	2,994	2,714	2,495	2,337	1,566	1,370	1,281	1,107	1,7504
0,1600	8,557	8,317	5,454	3,905	3,283	2,978	2,732	2,563	1,745	1,533	1,437	1,254	2,2405
0,2000	8,862	8,994	5,725	4,162	3,521	3,189	2,925	2,742	1,901	1,677	1,574	1,374	2,8006
0,2500	9,030	9,498	5,929	4,382	3,723	3,380	3,095	2,899	2,046	**1,808**	**1,696**	1,482	3,5008
0,3200	9,058	9,841	6,071	4,571	3,904	3,564	3,248	3,035	2,173	**1,931**	**1,812**	1,594	4,4810
0,4000	8,858	9,944	6,127	4,669	4,019	3,676	3,352	3,131	2,279	2,028	1,906	1,673	5,6012
0,5000	8,759	9,843	6,125	4,735	4,104	3-767	3,430	3,197	2,364	2,107	1,981	1,746	7.0015
0,6000	8,476	9.546	6,046	4,734	4,123	3,797	3,446	3,210	2,400	2,146	2,022	1,796	8.4018
0,7000	8,209	9,215	5,953	4,703	4,114	3-792	3,435	3,203	2,417	2,161	2,042	1,810	9.8021
0,8000	7,947	8,860	5,852	4,664	4,091	3.786	3,424	3,189	2,423	2,177	2,054	1,826	11.202
0,9000	7,710	8,520	5.745	4,608	4,062	3,769	3,401	3.166	2,430	2,183	2,063	1,839	12,603
1,0000	7,478	8,188	5,635	4,559	4,023	3.736	3,375	3,139	2,423	2,181	2,062	1,843	14,003
1,2500	6,943	7.435	5.353	4,389	3,908	3,640	3,281	3,046	2,393	2,157	2,039	1,825	17,504
1,6000	6,286	6,589	4,966	4,146	3,704	3,461	3,118	2,880	2,309	2,090	1,976	1,773	22,405
2,0000	5,646	5,892	4.557	3,860	3,468	3,254	2,916	2,702	2,187	1,996	1,887	1,700	28,006
2,5000	4,986	5,225	4,111	3,531	3,194	3,001	2,684	2,491	2,047	1,862	1 ,768	1,603	35,007
3,2000	4,281	4,522	3.6CO	3,132	2,851	2,682	2,405	2,225	1,858	1,699	1,613	1,465	44,810
4,0000	3,682	3,921	3,147	2,766	2,533	2,386	2,150	1,983	1,677	1,536	1,463	1,331	56,012
5,0000	3,138	3,364	2,719	2,409	2,219	2,094	1,887	1,746	1,496	1.365	**1,308**	1,194	70,015
6,0000	2,742	2,948	2,397	2,138	1,973	1,869	1,687	1,560	1,337	1.234	**1,182**	1,086	84,018
7,0000	2,433	2,628	2,145	1,922	1,776	1,688	1,527	1,414	1,223	1,124	1,079	0,993	98,021
8,0000	**2,191**	2,372	1,944	1,750	1,619	1,540	1,400	1,293	1,124	1,036	0,995	0,918	112,02
9,0000	**1,998**	2,162	1,779	1,606	1,489	1,418	1,290	1,194	1,041	0,961	0,923	0.854	126,03
10,0000	1,835	1,986	1,641	1 489	1,379	1,315	1,197	1.111	0,968	0,898	0,865	0,799	140.03
11.0000	1,699	1,841	1,525	Ь388	1,278	1,228	1,118	1,042	0,909	0,845	0,816	0,752	154,03
12,0000	1,583	1,714	1,425	1,299	1,207	1,153	1,050	0,980	0,856	0,798	0,769	0.710	168,04

Мэв,. а.е.м.	,,	He	N		Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар		Вода	1 *Е.* Мэв
0,0125	6,754	2,881	1,909	1,794	1,594	1,052	0,645	0,457	0,302	2,415	3,072	2,347	0,1750
0,0160	7,498	3,162	2,125	1,999	1,777	1,200	0,744	0,530	0,352	2,716	3,456	2,610	0,2240
0,0200	8,155	'3.349	2,317	2,182	1,952	1,355	0,845	0,615	0,411	3,012	3,829	2,845	0,2801
0,0250	8,863	3,517	2,527	2,381	2,155	1,546	0,988	0,721	0,522	3,336	4,246	3,102	0,3501
0,0320	9,826	3,729	2,763	2,631	2,403	1,801	1,170	0,882	0,614	3.-746	4,778	3,429	0,4481
0,0400	**10,792**	3,924	3,006	2 893	2,664	2,081	1,379	1,057	0,751	4,172	5,322	3,769	0,5601
0,0500	**11,807**	4,152	3,278	3^189	2,968	2,394	1,612	1,256	0,910	4,616	5,886	4,145	0,7001
0,0600	12,907	4.417	3.582	3,462	3,273	2,693	1,832	1,441	1,059	5,027	6,418	4,513	0,8402
0,0700	13,977	4,733	3,876	3.764	3,570	2,977	2,028	1,612	1,192	5,417	6,910	4,848	0,9802
0,0800	15,095	5,068	4,1£0	4,063	3,867	3,249	2,227	1,775	1,318	5.794	7,382	5,290	1,1202
0,0900	16,155	5,420	4,482	4,369	4,159	3,509	2,412	1,929	1,429	6,152	7,823	5,679	1,2603
0,1000	17,306	5,807	4,814	4,662	4,435	3,759	2,596	2,066	1,532	6,492	8,256	6,067	1,4003
0,1250	20,214	6,747	5.576	5.372	5,133	4,333	2,984	2,378	1,767	7,302	9,293	7,022	1,7504
0,1600	24,160	8,055	6,610	6,370	6,043	5,034	3,452	2,749	2,040	8,328	10,580	8,344	2,2405
0,2000	28,110	9,332	7,643	7,339	6 939	5,639	3,836	3,046	2,250	9,240	11,725	9,647	2.8006
0,2500	32,135	10,637	8,627	8,307	7,'755	6,131	4,144	3,249	2,389	10,044	12,730	10,957	3.5008
0,3200	36,060	11,771	9.574	9,137	8,359	6,405	4,274	3,333	2.434	10,697	13,586	12,129	4.4810
0,4000	38,233	12,622	10,024	9,528	8.627	6,440	4,258	3,315	2.414	10,986	13,988	12,720	5,6012
0,5000	39,078	12,985	10,088	9,598	8,587	6,315	4,165	3,252	2,370	10,982	14,020	12,875	7,0015

МэВ, а.е.м.	и	Не	N	О	Ne	Ar	Кг	Хе	Rn	Майлар	$(CH_2)^n$	Вода	*E*, МэВ
0,6000	38,389	12,877	9,745	9,262	8,276	6,052	4,014	3,132	2,291	10,652	13,669	12,496	8,4018
0,7000	36,552	12,561	9,239	8,781	7,858	5,739	3,840	2,988	2,209	10,210	13,121	11,865	9,8021
0,8000	34,352	12,055	8,714	8,310	7,426	5,431	3,675	2,868	2,130	9,738	12,500	11,201	11,202
0,9000	32,174	11,468	8,216	7,831	6,963	5,136	3,505	2,769	2,057	9,279	11,899	10,537	12,603
1,0000	30,373	10,983	7,838	7,438	6,627	4,908	3,381	2,694	2,000	8,864	11,355	9,985	14,003
1,2500	26,604	9,962	7,093	6,771	6,017	4,512	3,169	2,559	1,932	8,013	10,176	8,977	17,504
1.6000	22,444	8,789	6,346	6,068	5,432	4,146	2,974	2,418	1,872	7,076	8,854	7,885	22,405
2,0000	18,866	7,733	5,733	5,459	4,940	3,837	2,803	2,301	1,809	6,289	7,747	6,949	28,006
2,5000	15,539	6,680	5,102	4,855	4,481	3,544	2,631	2,191	1,743	5,533	6,697	6,043	35,007
3,2000	12,601	5.599	4.439	4,238	3,935	3,186	2,423	2,016	1,617	4,763	5,678	5,166	44,810
4,0000	10,386	4,696	3,840	3.682	3,462	2,832	2,172	1,828	1,479	4,110	4,843	4,428	56,012
5,0000	8,648	3,930	3,288	3,165	2,983	2,472	1,923	1,624	1,333	3.519	4,120	3,775	70,015
6,0000	7,454	3,389	2,881	2,771	2,624	2,191	1,711	1,455	1,198	3,077	3,593	3,291	84,018
7,0000	6,586	2,991	2,570	2,478	2,343	1,969	1,549	1,321	1,092	2,744	3,194	2,935	98,021
8,0000	5,909	2,673	2,323	2,241	2,117	1,786	1,405	1,205	1,001	2,477	2,887	2,650	112,02
9,0000	5.355	2,434	2,119	2,046	1,936	1,637	1,2£0	1,108	0,925	2,256	2,617	2,414	126,03
10,0000	4,908	2,241	1,955	1 888	1,786	1,510	1,193	1,026	0,859	2,075	2,403	2,223	140,03
11,0000	4,529	2,077	1,816	Ь754	1,659	1,403	1,112	0,956	0,801	1,923	2,225	2,062	154,03
12,0000	4,203	1,936	1.697	1,639	1,550	1.311	1.042	0.896	0.751	1.792	2,070	1.924	168.04

1блица 42.14. **Пробег R, мг/см^, ионов азота в различных веществах** [1]

—энергия на единицу массы падающей частицы; £ —полная энергия

ИэВ/а.е.м.	Be	с	Аı	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	, и	
0,0125	0,073	0,083	0,116	0,176	0,209	0,247	0,272	0,303	0,474	0,561	0,614	0,734	0,1750
0,0160	0,088	0,100	0,139	0,210	0,250	0,293	0,322	0,358	0,559	0,661	0,721	0,861	0,2240
0,0200	0,103	0,118	0,163	0,246	0,293	0,341	0,375	0,414	0,647	0,763	0,833	0,992	0, 2801
0,0250	0,120	0,138	0,191	0,287	0,342	0,396	0,434	0,479	0,747	0,880	0,960	1,141	0,3501
0,0320	0,141	0,163	0,225	0,338	0,405	0,466	0,509	0,560	0,874	**1,028**	1,120	1,328	0,4481
0,0400	0,163	0,189	0,261	0,391	0,469	0,537	0,586	0,644	1,004	**1,180**	1,285	1,520	0,5601
0,0500	0,188	0,219	0,301	0,451	0,542	0,617	0,673	0,737	1,151	1,349	1,469	1,734	0,7001
0,0600	0,211	0,245	0,338	0,505	0,608	0,691	0,752	0,823	1,284	1,503	1,635	1,928	0,8402
0,0700	0,232	0,270	0,372	0,556	0,669	0,758	0,826	0,902	1,407	1,643	1,787	2,105	0,9802
0,0800	0,252	0,294	0,405	0,604	0,727	0,822	0 894	0,976	1,521	1,774	1,928	2,269	1,1202
0,0900	0,272	0,316	0,436	0,649	0,781	0,882	0,'960	1,046	1,628	1,896	2,060	2,422	1,2604
0.1000	0,291	0,337	0,466	0,693	0,833	0,940	1,023	1,114	1,730	2,012	2,185	2,567	1,4003
0,1250	0,335	0,387	0,538	0,795	0,956	1,075	1,169	1,271	1,966	2,282	2,475	2,903	1,7504
0,1600	0,394	0,449	0,630	0,926	1,112	1,247	1,357	1,470	2,261	2,619	2,835	3,317	2,2405
0,2000	0,458	0,513	0,730	1,064	1,276	1,429	1,554	1,681	2,568	2,968	3,207	3,743	**2,8006**
0,2500	0,536	0,589	0,850	1,228	1,469	1,642	1,787	1,929	2,923	3,369	3,635	4,233	3,5008
0,3200	0,644	0,690	1,013	1,447	1,726	1,924	2,095	2,259	3,387	3,893	4,193	4,870	4,4810
0,4000	0,769	0,803	1,197	1,689	2,008	2,233	2,435	2,622	3,890	4,458	4,795	5,555	5,6012
0,5000	0,927	0,945	1,425	1,987	2,353	2,609	2,847	3,064	4,493	5,135	5,515	6,374	7,0015
0,6000	1,089	1,089	1,655	2,282	2,693	2,979	3,254	3,501	5,080	5,794			8,4018
0,7000	1,257	1,238		2,579	3,033	3,348	3,661	3,938	5,662	6,444	6,904	7,941	9,8021
0,8000	1,430		2;i26	2,878	3,374	3,717	4,070	4,376	6,240	7,089	7.587	8,712	11,202
0,9000	1,609	U555	2,368	3,180	3,718	4,088	4,480	4,817	6,817	7,731	8,267	9,476	12,603
1,0000	1,793	1,722	2,614	3,485	4,064	4,461	4,893	5,261	7,394	8,373	8,946	10,236	14,003
1,2500	2,279	2,171	3,251	4,268	4,94/	5,410	5,945	6,393	8,847	9,986	10,653	12,145	17,504
1,6000	3,021	2,871	4,202	5,417	6,235	6,791	7,477	8,047	10,932	12,294	13,093	14,868	22,405
2,0000	3,962	3,771	5,380	6,817	7,798	8,461	9,335	10,056	13,425	15,036	15,994	18,095	**28,006**
2,5000	5,283	5,034	6,999	8,715	9,904	10,703	11,839	12,756	16,736	18,670	19,830	22,339	35,007
3,2000	7,409	7,055	9,552	11,668	13,157	14,164	15,703	16,927	21,769	24,188	25,644	28,743	44,810
4,0000	10,237	9,721	12,887	15,481	17,333	18,601	20,604	22,271	28,126	31,134	32,948	36,000	56,012
5,0000	14,369	13,587	17,687	20,920	23,254	24,882	27,610	29,816	36,987	40,828	43.092	47,909	70,015
6,0000	19,153	18,044	23,183	27,102	29,961	31,974	35,472	38,317	46,907	51,635	54.376	60,230	84,018
7,0000	24,584	23,083	29,369	34,021	37.454	39,868	44,208	47,759	57,873	63,540	66,795	73,784	98,021
8,0000	30,658	28,700	36,235	41,667	45,721	48,564	53,797	58,131	69,834	76,530	80,323	88,419	112,02
9,0000	37,359		43.773	50,028	54,748	58,052	64,229	69,414	82,796	90,580	94,944	104,253	126.03
10,0000	44,678	4Ь656	51,974	59,090	64,529	68,316	75,510	81,582	96,755	105,669	110.624	121,215	140.04
11,0000	52,615	48,985	60,832	68,839	75,048	79,346	87,626	94,607	111,691	121,757	127,303	139,290	154.03
12,0000	61,160	56,874	70,337	79,273	86,290	91,125	100,559	108,473	127,573	138.822	144,987	158,473	168.04

МэВ/а. е. м.	и	Не	N	О			Кг	Хе	Rn	Майлар		Bofla	Б, МэВ
0,0125	0,027	0,069	0,100	0,106	0,119	0,186	0,318	0,469	0,733	0,080	0,063	0,077	0,1750
0,0160	0,033	0,0£4	0,122	0,129	0,144	0,224	0,379	0,555	0,863	0,097	0,076	0,095	0,2240
0,0200	0,039	0,100	0,145	0,154	0,171	0,263	0,442	0,643	0,994	0,116	0,090	0,114	0,2801
0,0250	0,047	0,119	0,172	0,182	0,203	0,308	0,512	0,739	1,133	0,136	0,107	0,136	0,3501
0,0320	0,057	0,145	0,207	0,219	0,244	0,363	0,597	0,854	1,295	0,163	0,128	0,164	0,4481
0,0400	0,067	0,173	0,244	0,258	**0,286**	0,419	0,681	0,965	1,452	0,190	0,149	0,194	0,5601
0,0500	0,079	0,207	0,288	0,303	0,334	0,479	0,772	1,082	1,615	0,221	0,173	0,228	0,7001
0,0600	0,090	0,239	0,327	0,344	0,378	0,533	0,851	1,184	1.754	0,250	0,196	0,260	0,8402
0,0700	0,100	0,269	0,364	0,382	0,418	0,582	0,'922	1,274	1,876	0,276	0,216	0,289	**0,9802**
0,0800	0,110	0,297	0,398	0,417	0,455	**0,626**	0,987	1,355	1,986	0,301	0,236	0,316	**1,1202**
0,0900	0,119	0,324	0,430	0,450	0,489	0,667	1,048	1,431	2,088	0,324	0,254	0,341	1,2603
0,1000	0,127	0,349	0,460	0,481	0,522	0,706	1,104	1,501	2,183	0,346	0,272	0,365	1,4003
0,1250	0,146	0,405	0,528	0,550	0,595	0,792	1,229	1,658	2,395	0,397	0,312	0,419	1,7504
0,1600	0,168	0,471	0,608	0,634	0,683	0,897	1,381	1,850	2,653	0,460		0,483	2,2405
0,2000	0,189	0,535	0,687	0,716	0,769	**1,002**	1,535	2,043	2,914	0,523	0 Üii	0,545	2,8006
0,2500	0,212	0,606	0,773	0,805	0,864	1,121	1,710	2,265	3,215	0,596	0,468	0,613	3,5008
0,3200	0,241	0,693	0,881	0,918	0,986	1,277	1,943	2,562	3,621	0,690	0,543	0,698	4,4810
0,4000	0,271	0,785	0,995	1,038	ЫІ8	1,451	2,205		4,082	0,794	0,624	0,788	5,6012
0,5000	0,308	0,894	1,134	1,184	1, 280	1,671	2,537	3^325	4,667	0,921	0,724	0,897	7,0015
0,6000	0,344	1,002	1,275	1,332	1,446	1,897	2,880	3,764	5,268	1,050	0,825	1,007	8,4018
0,7000	0,381	1,112	1,423	1,488	**1,620**	2,135	3,236	4,222	5,890	1,185	0,929	1,122	9,8021
0,8000	0,421	1,226	1,579	1,652	1,803	2,386	3,609	4,700	6,536	1,325	1,039	1,244	11,202
0,9000	0,463	1,345	1,744	**1,825**		2,651	3,999	5,197	7,205	1,472	1,154	1,373	12,603
1,0000	0,507	1,470	1,919	**2,009**	2^204	2,930	4,406	5,710	7.895	1,627	1,274	1,50£	14,003
1,2500	0,631	1,805	2,388	2,502	2,758	3,674	5,476	7,043	9,675	2,042	1,60C	1,87£	17,504
1,6000	0,831	2,329	3,119	3.267	3,616	4,807	7,072	9,013	12,251	2,693	2,116	2,465	22,405
2,0000	1,104	3,009	4,048	4,240	4,698	**6,212**	9,012	11,388	15,295	3,533	2,793	3,21£	28,006
2,5000	1,513	3,984	5.344	5.602	6,187	8,112	11,592	14,507	19,235	4,722	3,766	4,301	35,007
3,2000	2,215	5,590	7,408	7,767	8,526	11,034	15,479	19,176	25,085	6,635	5,36C	6,05£	44,810
4,0000	3,197	7,781	10,128	10,610	11,568	14,770	20,372	25,021	32,341	9,173	7,50	8,40e	56,012
5,0000	4,680	11,051	14,080	14,723	15,937	20,076	27,242	33,168	42,337	12,865	10,645	11,845	70,015
6,0000	6,428	14,897	18,640	19,461	20,952	26,106	34,977	42,297	53,43£	17,130	14,29:	15,824	84,018
7,0000	8,430	19,303	23,795	24,815	26,609	32,858	43,592	52,411	65,698	21,957	18,43.	20,337	98,021
8,0000	10,678	24,263	29,534	30,765	32,905	40,334	53,095	63,521	79,107	27,336	23,0ВЕ	25,36e	112,02
9,0000	13,170	29,760	35,852	37,311	39,831	48,531	63,506	75,649	93,675	33,267	28,16£	30,90^	126,03
10,0000	15,904	35,762	42,739	44,443	47,369	57,446	74,803	88,792	109,39£	39,745	33,75'	36,95£	140,03
11,0000	18,876	42,258	50,175	52,145	55,510	67,074	86,969	102,941	126,301	46,761	39,8Г	43,50f	154,03
12,0000	22.087	49,245	58,157	60,410	64,246	77,406	99,990	118,077	144,372	54,308	46,34e	50,5421	168.04

Таблиц; 42.15. **Массовая тормозная способность веществ,** МэВ/(мг **см-2), для ионов кислорода '30+** [1]

Е„ —энергия на единицу массы падающей частицы; *Е* — полная энергия

МэВ/а.е.м.	[1] Be	С	Аı	Ti	Ni	Ge					Au	и	*Е.* МэВ
0,0125	3,228	2,671	1,956	1,301	1,056	0,8S9		О,£22	0,522	0,447	0,411	0,352	0,1999
0,0160	3,652	3,021	2,213	1,472	1,195	1,085	1,005	0,930	0,591	0,506	0,465	0,398	0,2559
0,0200	4,083	3,378	2,475	1,646	1,336	1,213	1.124	1,039	**0, 661**	0,565	0,520	0,445	0,3199
0,0250	4,565	3,777	2,767	1,840	1,494		1,256	**1, 162**	0,739	0,632	0,582	0,498	0,3999
0,0320	5,159	4,276	3,130	2,082	1,694	1,540	1,421	1,315	0,836	0,717	0,660	0,567	0,5118
0,0400	5,754	4,791	3.500	2,334	1,904	1,736	1,599	1,480	0,941	**0, 810**	0,745	0,640	0,6398
0,0500	6,363	5.334	3,885	2,603	2,133	1,942	1,791	1,659	1,053	0,915	0,843	0,725	0,7997
0,0600	6,890	5,830	4,222	2,846	2,339	2,124	1,963	1, 820	1,165	1,013	0,935	0,804	0,9597
0,0700	7,347	6,284	4,521	3,065	2,532	2,297	2.125	1,971	**1, 266**	**1,108**	1,026	0,882	1,1196
0,0800	7,748	6,714	4,789	3,271	2,706	2,452	2,265	2,107	1,365	1,197	1,106	0,953	I,2796
0,0900	8,103	7,113	5,030	3,461	2,867	2,606	2,399	2,233	1,464	**1, 280**	1,187	1,024	1,4395
0,1000	8,423	7.489	5,248	3,637	3,023	2,739	2,519	2,356	1,553	1,359	1,260	1,086	1,5995
0,1250	9,075	8,373	5,707	4,018	3,356	3,042	2,797	**2,620**	1,755	1,535	1,435	1,241	1,9994
0,1600	9,710	9,438	6,189	4,431	3,726	3,379	3,101	2,909	1,980	1,739	1,631	1,423	2,5592
0,2000	10,171	10,323	6,571	4,777	4,041	3,660	3358	3.147	**2, 181**	1,925	1,807	1,577	3,1990
0,2500	10,478	11,022	6,880	5,084	4,321	3,922	3,591	3,364	2,374	2,098	1,968	1,720	3.9988
0,3200	10,635	11,555	7,128	5,367	4,583	4,184	3,814	3,564	2,552	2,267	2,128	1,871	5,1184
0,4000	10,635	11,806	7.274	5.543	4,772	4,364	3,979	3,717	2,706	2,408	2,262	1,986	6,3980

Продолоюение табл. 42 13

Е . МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	и	*Е.* МэВ
0,5000	10,525	11,828	7,360	5,689	4,931	4,526	4,122	3,842	2,841	2,532	2,381	2,098	7,9975
0,6000	10,274	11,571	7,328	5,738	4,998	4,602	4,177	3,891	2,909	2,601	2,451	2,176	9,5970
0,7000	10,004	11,230	7,255	5,731	5,013	4,621	4,186	3,903	2,945	2,633	2,488	2,205	11.196
0,8000	9,716	10,832	7,155	5,702	5,001	4,629	4,185	3,899	2,962	2,662	2,511	2,232	12,796
0,9000	9,445	10,438	7,038	5,645	4,976	4,617	4,167	3,878	2,977	2,675	2,527	2,252	14,395
0,1000	9,172	10,043	6,912	5,592	4,935	4,583	4,140	3,850	2,972	2,675	2,530	2,260	15,995
1,2500	8,532	9,137	6,578	5,394	4,802	4,473	4,033	3,743	2,941	2,651	2,506	2,243	19,994
1,6000	7,743	8,116	6,116	5,107	4,562	4,263	3,841	3,547	2,844	2,575	2,434	2,183	25,592
2,0000	6,978	7,282	5,632	4,770	4,286	4,021	3,604	3,340	2,703	2,467	2,332	2,101	31,990
2,5000	6,196	6,492	5,108	4,338	3,969	3,729	3,335	3,095	2,544	2,314	2,196	1,992	39,987
3,2000	5,360	5,662	4,508	3,922	3,570	3,358	3,011	2,786	2,326	2,128	2,020	1,835	51,184
4,0000	4,646	4,947	3,971	3,490	3,196	3,010	2,712	2,501	2,116	1,938	**1,846**	1,680	63,980
5,0000	3,988	4,275	3,456	3,062	2,820	2,661	2,398	2,219	1,901	1,735	**1,662**	1,517	79,975
6,0000	3,502	3,765	3,061	2,731	2,519	2,388	2,155	1,993	1,708	1,577	1,509	1,387	95,970
7,0000	3,118	3,368	2,749	2,463	2,276	2,164	1,957	1,812	1,567	1,441	1,383	1,273	111,96
8,0000	2,814	3,046	2,497	2,247	2,080	1,977	1,798	1,660	1,443	1,331	1,278	1,178	127,96
9,0000	2,569	2,779	2,288	2,066	1,915	1,823	1,659	1,535	1,338	1,235	1,187	1,098	143,95
10,0000	2,361	2,556	2,112	1,916	1,774	1,692	1,540	1,430	1,246	1,155	1,113	1,029	159,95
11,0000	2,186	2,368	1,962	1,786	1,656	1,580	1,438	1,340	1,169	1,087	1,050	0,967	175,94
12,0000	2,036	2,205	1,833	1,672	1,552	1,483	1,351	1,261	1,102	1,026	0,990	0,913	191,94

МэВ/а.е.м.	H	He	N	o	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	(CHJ^	Вода	Б, МэВ
0,0125	7,337	3,130	2,074	1,949	1,731	1,143	0,700	0,497	0,328	2,624	3,338	2,547	0,1999
0,0160	8,146	3,435	2,309	2,171	1,930	1,304	0,808	0,576	0,382	2,951	3,754	2,835	0,2559
0,0200	8,860	3,638	2,517	2,371	2,121	1,472	0,918	0,668	0,447	3,272	4,160	3,091	0,3199
0,0250	9,629	3,821	2,745	2,587	2,341	1,679	1,074	0,783	0,567	3,625	4,612	3,370	0,3999
0,0320	10,674	4,051	3,002	2,858	2,611	1,956	1,271	0,958	0,667	4,069	5,190	3,725	0,5118
0,0400	11,724	4,263	3,265	3,143	2,894	2,261	1,498	1,148	0,815	4,532	5,782	4,095	0,6398
0,0500	12,859	4,522	3,570	3,473	3,232	2,607	1,756	1,367	0,991	5,027	6,410	4,514	0,7997
0,0600	14,101	4,826	***3,914***	3,783	3,576	2,943	2,001	1,575	1,157	5,493	7,012	4,931	0,9597
0,0700	15,326	5,190	4,250	4,128	3,915	3,264	2,224	1,768	1,307	5,941	7,577	5,371	1,1196
0,0800	16,617	5,579	4,602	4,473	4,257	3,577	2,452	1,954	1,451	6,379	8,127	5,823	1,2796
0,0900	17,857	5,991	4,955	4,829	4,597	3,878	2,666	2,133	1,579	6,801	8,647	6,278	1,4395
0,1000	19,208	6,445	5,342	5,175	4,923	4,172	2,881	2,293	1,700	**7,205**	9,163	6,733	1,5995
0,1250	22,658	7,562	6,250	6,021	5,753	4,857	3,345	2,665	1,980	**8,184**	10,416	7,871	1,9994
0,1600	27,416	9,141	7,501	7,228	6,857	5,712	3,917	3,119	2,315	9,450	12,006	9,469	2,5592
0,2000	32,262	10,710	8,772	8,424	7,964	6,472	4,402	3,496	2,582	10,605	13,457	11,072	3,1990
0,2500	37,290	12,343	10,010	9,639	8,999	7,114	4,809	3,770	2,773	11,655	14,771	12,714	3,9988
0,3200	42,341	13,821	11,241	10,728	9,815	7,520	5,018	3,913	2,858	12,560	15,953	14,242	5,1184
0,4000	45,391	14,985	11,900	11,311	10,242	7,645	5,056	3,935	2,866	13,043	16,607	15,101	6,3980
0,5000	46,957	15,603	12,122	11,533	10,319	7,588	5,005	3,908	2,848	13,196	16,847	15,471	7,9975
0,6000	46,534	15,609	11,813	11,227	10,032	7,335	4,866	3,796	2,777	12,912	16,569	15,147	9,5970
0,7000	44,543	15,307	11,259	10,700	9,576	6,993	4,679	3,642	2,691	12,442		14,458	11,196
0,8000	41,998	14,739	10,653	10,160	9,079	6,639	4,493	3,506	2,604	11,905	15^282	13,694	12,796
0,9000	39,414	14,048	10,065	9,593	8,530	6,292	4,293	3,392	2,520	11,367	14,576	12,908	14,395
1,0000	37,256	13,471	9,615	9,124	8,129	6,020	4,147	3,304	2,454	10,873	13,928	12,248	15,995
1,2500	32,694	12,242	8,716	8,322	7,394	5,546	3,894	3,144	2,375	9,848	12,505	11,032	19,994
1,6000	27,644	10,825	7,816	7,474	6,691	5,107	3,663	2,978	2,306	8,715	10,905	9,712	25,592
	23,317	9,558	7,085	6,747	6,105	4,742	3,464	2,844	2,236	7,772	9,574	8,589	31,990
2,5000	19,307	8,300	6,339	6,032	5,567	4,403	3,269	2,722	2,166	6,875	8,320	7,508	39,987
3,2000	15,777	7,010	5,558	5,306	4,927	3,989	3,034	2,524	**2,024**	5,964	7,109	6,469	51,184
4,0000	13,103	5,924	4,844	4,646	4,368	3,574	2,740	2,307	**1,866**	5,186	6,111	5,587	63,980
5,0000	10,990	4,994	4,178	4,023	3,791	3,142	2,443	2,063	1,693	4,472	5,236	4,797	79,975
6,0000	9.520	4,329	3,680	3,539	3,352	2,798	2,186	1,858	1,531	3,931	4,589	4.203	95,970
7,0000	8,440	3,832	3,294	3,175	3,002	2,524	1,985	1,694	1,399	3,516	4,094	3,761	111,96
8,0000	7,590	3,433	2,983	2,879	2,719	2,294	1,805	1.548	1,286	3,181	3,695	3,403	127,96
9,0000	6,886	3,129	2,725	2,631	2,489	2,105	1,659	1,425	1,190	2,901	3,365	3,104	143,95
10,0000		2,883	2,515	2,429	2,298	1,943	1,535	1,320	1,105	2,670	3,092	2,860	159,95
11,0000	5,828	2,673	2,337	2,257	2,135	1,805	1,430	1,230	1,030	2,474	2,863	2,653	175,94
12,0000	5,407	2,491	2,183	2,108	1,994	1,686	1,340	1,153	0,966	2,306	2,663	2,474	191,94

Таблица 42.16. Пробег R, мг/см^, ионов кислорода в различных веществах [1]

Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	rig	Eu	Ta	Au	и
0,075	0,084	0,117	0,176	0,208	0,247	0,273	0,304	0,474	0,562	0,614	0,736
0,090	0,101	0,141	0,212	0,251	0,295	0,324	0,360	0,561	0,663	0,725	0,866
0,106	0,120	0,166	0,249	0,295	0,345	0,378	0,419	0,652	0,770	0,840	1,002
0,123	0,141	0,194	0,291	0,346	0,402	0,440	0,486	0,756	0,891	0,971	1,156
0,146	0,167	0,230	0,345	0,411	0,474	0,518	0,570	0,887	1,044	1,138	1,250
0,168	0,195	0,267	0,400	0,478	0,549	0,598	0,657	1,023	1,202	1,309	1,550
0,194	0,225	0,309	0,462	0,554	0,632	0,689	0,755	1,176	1,378	1,500	1,773
0,218	0,253	0,348	0,519	0,623	0,709	0,771	0,844	1,314	1,538	1,673	1,974
0,240	0,279	0,384	0,572	0,687	0,779	0,848	0,926	1,442	1,684	1,831	2,158
0,262	0,304	0,418	0,622	0,746	0,845	0,919	1,003	1,560	1,819	1,977	2,328
0,282	0,327	0,450	0,668	0,802	0,907	0,986	1,076	1,671	1,945	2,113	2,486
0,301	0,349	0,481	**0,714**	0,856	0,966	1,050	1,144	1,775	2,064	2,241	2,635
0,347	0,399	0,554	**0,818**	0,981	1,104	1,201	1,305	2,017	2,340	2,538	2,978
0,406	0,462	0,648	0,950	1,139	1,279	1,390	1,507	2,316	2,682	2,903	3,399
0,470	0,527	0,748	1,089	1,304	1,460	1,588	1,718	2,624	3,031	3,275	3,825
0,548	0,602	0,867	1,251	1,495	1,671	1,818	1,963	2,974	3,428	3,699	4,309
0,654	0,701	1,026	1,465	1,746	1,947	2,120	2,286	3,428	3,941	4,245	4,932
0,774	0,810	1,204	1,699	2,019	2,246	2,448	2,637	3,915	4,488	4,827	5,595
0,925	0,945	1,422	1,984	2,349	2,605	2,843	3,060	4,491	5,135	5,516	6,379
1,079	1,082	1,640	2,264	2,671	2,956	3,228	3,474	5.047	5,758	6,178	7,127
1,236	1,222	1,859	2,542	2,990	3,302	3,610	3,884	5,593	6,369	6,825	7,856
1,398	1,367	2,081	2,822	3,309	3,648	3,992	4,294	6,135	6,973	7,465	8,577
1,565	1,518	2,306	3,104	3,630	3,994	4,375	4,705	6,673	7,572	8,099	9,290
1,737	1,674	2,536	3,389	3,953	4,432	4,760	5,119	7,211	8,170	8,732	9,999
2,189	2,091	3,128	4,117	4,774	5,225	5,739	6,172	8,563	9,671	10,319	11,774
2,878	2,741	4,011	5,183	5,970	6,507	7,161	7,708	10,498	11,813	12,585	14,303
3,749	3.574	5.102	6,480	7,417	8,052	8,881	9.568	12,807	14,352	15,271	17,291
4,967	4,739	6,594	8,230	9,358	10,119	11,190	12,057	15,858	17,702	18,808	21.202
6,914	6,589	8,932	10,933	12,337	13,288	14,728	15,876	20,468	22,755	24,131	27,067
9,483	9,012	11,963	14,398	16,132	17,320	19,214	20,732	26,244	29,067	30,768	34,367
13,209	12,499	16,291	19,303	21,471	22,985	25,499	27,536	34,235	37,809	39,916	44,407
17,497	16,493	21,218	24,844	27,483	29,342	32,547	35,156	43,128	47,496	50,031	55,451
22,346	20,992	26,740	31,021	34,172	36,389	40,345	43,586	52,916	58,124	61,117	67,505
27,753	25,992	32,852	37,828	41,532	44,131	48,882	52,819	63,565	**69,689**	73,160	80,579
33,709	31,495	39,552	45,259	49,555	52,563	58,155	62,848	75,085	**82,175**	86,156	94,653
40,209	37,502	46,835	53,306	58,240	61,678	68,172	73,653	87,481	95,574	100,080	109,714
47,254	44,008	54,698	61,961	67,578	71,469	78,928	85,215	100,740	109,856	114,886	125,760
54,840	51,012	63,137	71,224	77,559	81,926	90,409	97,525	114,840	125,007	130,587	142,791

и	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CHr)_n$	Вода
0,027	0,070	0,101	0,107	0,119	0,185	0,316	0,466	0,729	0,081	0,063	0,078
0,033	0,085	0,123	0,131	0,145	0,225	0,379	0,555	0,863	0,099	0,077	0,096
0,040	0,102	0,147	0,156	0,174	0,266	0,444	0,645	0,998	0,118	0,092	0,116
0,048	0,122	0,175	0,186	0,206	0,312	0,517	0,745	1,141	0,139	0,109	0,138
0,058	0,149	0,212	0,224	0,249	0,370	0,605	0,865	1,309	0,167	0,131	0,168
0,069	0,179	0,251	0,265	0,293	0,427	0,693	0,980	1,473	0,195	0,153	0,199
0,082	0,214	0,296	0,311	0,343	0,491	0,787	1,102	1,643	0,228	0,179	0,235
0,093	0,248	0,337	0,354	0,388	0,547	0,870	1,208	1,787	0,258	0,202	0,268
0,104	0,279	0,376	0,394	0,430	0,597	0,944	1,302	1,914	0,285	0,224	0,298
0,113	0,308	0,411	0,430	0,469	0,643	1,011	1,386	2,028	0,311	0,244	0,326
0,123	0,335	0,444	0,464	0,504	0,685	1,073	1,464	2,134	0,335	0,263	0,352
0,131	0,361	0,475	0,496	0,538	0,725	1,130	1,537	2,231	0,357	0,281	0,377
0,150	0,418	0,544	0,567	0,613	0,814	1,259	1,698	2,449	0,409	0,322	0,432
0,173	0,485	0,626	0,652	0,702	0,920	1,413	1,892	2,710	0,473	0,372	0,496
0,194	0,550	0,705	0,734	0,788	1,025	1,567	2,085	2,971	0,537	0,422	0,559
0,217	0,619	0,790	0,822	0,882	1,143	1,740	2,305	3,269	0,609	0,479	0,626
0,245	0,705	0,895	0,932	1,001	1,295	1,968	2,596	3,666	0,701	0,551	0,709
0,274	0,794	1,006	1,048	1,129	1,464	2,222	2,922	4,113	0,801	0,630	0,796
0,309	0,898	1,139	1,188	1,284	1,674	2,539	3,329	4,672	0,923	0,725	0,901
0,343	1,001	1,272	1,329	1,441		2,863	3,744	5,240	1,045	0,821	1,005

E МэВ/а.е.м.	и	Не	N	о	Ne	*At*	Kr	Хе	Rn	Майлар		Вода	*Е.* МэВ
0,7000	0,378	1,104	1,411	1,475	1,604	2,111	3,198	4,174	5,825	1,171	0,919	1,113	11,196
0,8000	0,415	1,211	1,557	1,628	1,776	2,346	3,547	4,622	6,429	1,303	1,022	1,227	12,796
0,9000	0,455	1,322	1,711	1,790	1,958	2,593	3,911	5,085	7,054	1,440	1,129	1,347	14,395
1,0000	0,496	1,438	1,874	1,961	2,150	2,853	4,290	5,563	7,697	1,584	1,241	1,474	15,995
1,2500	0,611	1,749	2,311	2,420	2,665	3,545	5,285	6,803	9,353	1,970	1,544	1,818	19,994
1,6000	0,797	2,236	2,989	3,130	3,462	4,597	6,767	8,633	11,745	2,575	2,024	2,359	25,592
2,0000	1,049	2,865	3,849	4,031	4,463	5,898	8,564	10,831	14,563	3,353	2,650	3,060	31,990
2,5000	1,427	3.764	5,044	5,286	5,836	7,650	10,942	13,707	18,198	4,448	3,547	4,058	39,987
3,2000	2,070	5,235	6,934	7,269	7,978	10,325	14,502	17,983	23,551	6,200	5,006	5,667	51,184
4,0000	2,962	7,226	9,405	9,852	10,741	13,720	18,948	23,293	30,145	8,506	6,952	7,801	63,980
5,0000	4.299	10,175	12,970	13,561	14,682	18,505	25,143	30,640	30,159	11,836	9,787	10,898	79,975
6,0000	5,866	13,622	17,057	17,809	19,177	23,910	32,077	38,823	49,111	15,658	13,057	14,468	95,970
7,0000	7,653	17,556	21,658	22,587	24,227	29,938	39,767	47,852	60,055	19,967	16,753	18,497	I П ,96
8,0000	9,654	21,971	26,767	27,884	29,833	36,593	48,227	57,743	71,992	24,756	20,871	22,974	127,96
9,0000	11,869	26,856	32,383	33,703	35,988	43,879	57,480	68,522	84,938	30,028	25,412	27,900	143,95
10,0000	14,297	32,186	38,498	40,036	42,682	51,795	67,512	80,194	98,903	35,780	30.375	33,273	159,95
11,0000	16,935	37,953	45,100	46,873	49,908	60,342	78,312	92,754	113,908	42,008	35,755	39,084	175,94
12,0000	19,786	44,156	52,186	54,211	57,665	69,515	89,873	106,192	129,652	48,709	41,551	45,331	191,94

Таблица 42.17. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг-см-2), для ионов фтора 4f+ [1]
Em- — энергия на единиз? массы падающей частицы; *Е* — полная энергия

МэВ/а.е. м.	Be	С	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Та	Ан	и	*Е.* МэВ
0,0125	3,408	2,819	2,066	1,374	1,115	1,012	0,938	0,868	0,551	0,472	0,434	0,372	0,2375
0,0160	3,856	3,190	2,337	1,554	1,262	1,145	1,061	0,981	0,624	0,534	0,491	0,421	0,3040
0,0200	4,311	3,566	2,613	1,737	1,411	1,280	1,186	1,097	0,698	0,597	0,549	0,470	0,3800
0,0250	4,820	3,987	2,921	1,943	1,577	1,431	1,326	1,227	0,780	0,667	0,615	0,526	0,4749
0,0320	5,446	4,514	3,305	2,198	1,788	1,626	1,500	1,388	0,882	0,757	0,697	0 598	0,6079
0,0400	6,074	5,058	3,695	2,464	2,010	1,833	1,689	1,563	0,994	0,855	0,787	о; 676	0,7599
0,0500	6,767	5,672	4,131	2,768	2,268	2,066	1,904	1,764	1,120	0,973	0,896	0,770	0.9499
0,0600	7,350	6,220	4,504	3,036	2,495	2,265	2,094	1,941	1,243	1,081	0,998	0,858	1,1399
0,0700	7,862	6,725	4,838	3,280	2,710	2,458	2,274	2,110	1,355	1,185	1,098	0,943	1,3299
0,0800	8,319	7,208	5,141	3,512	2,905	2,632	2,432	2,262	1,465	1,285	1,188	1,023	1,5198
0,0900	8,727	7,660	5,417	3,727	3,088	2,806	2,584	2,405	1,576	1,379	1,279	1,102	1,7098
0,1000	9,100	8,091	5,670	3,929	3,266	2,960	2,722	2,546	1,678	1,469	1,361	1,174	1,8998
0,1250	9,882	9,117	6,125	4,375	3,654	3,313	3,045	2,853	1,911	1,672	1,563	1,352	2,3747
0,1600	10,685	10,386	6,810	4,876	4,100	3,718	3,412	3,201	2,179	1,914	1,794	1,566	3,0397
0,2000	11,313	11,481	7,308	5,313	4,495	4,071	3,734	3,501	2,426	2,141	2,010	1,754	3,7996
0,2500	11,781	12,392	7,735	5,717	4,858	4,409	4,038	3,783	2,669	2,359	2,212	1,934	4,7495
0,3200	12,090	13,135	8,103	6,102	5,210	4,757	4,335	4,052	2,901	2,577	2,419	2,127	6,0794
0,4000	12,195	13,538	8,341	6,356	5,472	5,005	4,563	4,262	3,103	2,761	2,594	2,277	7,5992
0,5000	12,162	13,668	8,505	6,574	5,698	5,231	4,763	4,440	3,283	2,926	2,751	2,424	9,4990
0,6000	11,924	13,430	8,505	6,660	5^801	5,341	4,848	4,516	3,377	3,019	2,845	2,526	11,399
0,7000	11,647	13,074	8,446	6,672	5,836	5,380	4,873	4,544	3,429	3,066	2,897	2,568	13,299
0,8000	11,339	12,642	8,350	6,655	5,837	5,402	4,885	4,551	3,457	3,106	2,931	2,605	15,198
0,9000	11,047	12,208	8,232	6,602	5,820	5,400	4,873	4,536	3,482	3,128	2,955	2,634	17,098
1,0000	10,749	,1,769	8,100	6,553	5,783	5,370	4,852	4,512	3,483	3,135	2,965	2,649	18,998
1,2500	10,046	0,758	7,745	6,351	5,654	5,267	4,748	4,407	3,462	3,121	2,951	2,641	23,747
1,6000	9,176	9,618	7,248	6,052	5,407	5,052	4,552	4,204	3,370	3,051	2,885	2,587	30,397
2,0000	8,330	8,693	6,723	5,694	5,116	4,800	4,303	3,987	3,227	2,945	2,783	2,508	37,996
2,5000	7,459	7,816	6,149	5,282	4,778	4,489	4,015	3,726	3,062	2,786	2,644	2,398	47,495
3,2000	6,520	6,888	5,484	4,771	4,343	4,085	3,663	3,389	2,830	2,588	2,457	2,232	60,794
4,0000	5,706	6,077	4,877	4,287	3,926	3,697	3,331	3,073	2,600	2,380	2,268	2,063	75,992
5,0000	4,945	5,300	4,285	3,796	3,496	3,299	2,974	2,751	2,357	2,151	2,061	1,881	94,990
6,0000	4,372	4,701	3,822	3,409	3,145	2,981	2,691	2,488	2,133	1,968	1,884	1,731	113,99
7,0000	3,912	4,226	3,450	3,091	2,857	2,715	2,456	2,274	1,967	1,808	1,735	1,597	132,99
8,0000	3.544	3,837	3,145	2,830	2,620	2,491	2,264	2,091	1,818	1,676	1,610	1,484	151,98
9,0000	3,245	3,511	2,890	2,609	2,419	2,303	2,095	1,939	1,690	1,560	1,500	1,387	170,98
10,0000	2,988	3,234	2,673	2,424	2,245	2,141	1,949	1,810	1,577	1,462	1,409	1,302	189,98
11,0000	2,770	3,002	2,487	2,263	2,099	2,002	1,823	1,698	1,482	1,378	1,330	1,226	208,98
12,0000	2,583	2,797	2,325	2,120	1,969	1,881	1,713	1,600	1,397	1,302	1,255	1,158	227,98

Rn Майлар (CH-)

7,746	3,305	2,189	2,057	**1,828**	**1, 206**	0,739	0,525	0,346	2,770	3,524	2 689	0,2375
8,600	3,627	2,437	2,292	2,038	1,376	0,853	**0,608**	0,403	3,115	3,963	2^994	0,3040
9,353	3,841	2,657	2,503	2,239	1,555	0,969	0,705	0,472	3,454	4,392	3,263	0,380C
1-0,165	4,034	2,898	2,731	2,471	1,773	1,133	0,827	0,599	3,827	4,869	3,558	0,4749
11,269	4.276		3,017	2,756	**2,066**	1,342	**1, 011**	0,704	4,296	5,479	3,933	0,6079
12,378	4,500	3^447	3,318	3,056	2,387	1,581	1,212	**0, 861**	4,785	6,104	4,323	0,7599
13,674	4.808	3,796	3,693	3,437	2,772	1,867	1,454	1,053	5,346	6,816	4,800	0,9499
15,043	5,148	4,175	4,035	3,815	3,139	2,135		1,234	5,860	**7,481**	5,261	1,1399
16,402	5,554	4,548	4.417	4,190	3,493	2,380		1,398	6,358	**8,109**	5,748	1,3299
17,840	5,990	4,941	4,802	4,571	3,841	2,632	2,098	1,558	6,848	8,725	6,252	1,5198
19,232	6,452	5,336	5,201	4,951	4,177	2,871	2,297	1,701	7,324	9,312	6,761	1,7098
20,752	6,963	5,772	5,591	5,318	4,508	3,113	2,478	1,837	7,785	9,900	7,275	1,8998
24,673	8,235	6, £05	6,557	6,265	5,289	3,642	2,902	2,157	8,912	11,342	8,570	2^3747
30,169	10,059	8,254	7,954	7,546	**6.286**	4,311	3,432	2,547	**10,**	13,212	10,470	3,0397
35,883	11,912	9,756	9,369	8,858	7,199	4,896	**3,888**	2,872	11,795	14,967	12,314	3,7996
41,926	13,877	11,255	10,837	**10, 118**	7,998	5,407	4.239	3,117	13,104	16,608	14,295	4,7495
48,133	15,712	12,779	12,195	11,158	8,549	5,705	4.449	3,249	14,278	18,135	16,190	6.0794
52,050	17,183	13.646	12,971	11,745	8,767	5,797	4;513	3,286	14,956	19,043	17,317	7,5992
54,262	18,031	14,008	13,327	11,924	8,769	5,783	4,516	3.291	15,249	19,468	17,877	9,4990
54,009	18,116	13,711	13,030	11,644	8,514	5,648	4,406	3.224	14,	19,230	17,580	11,399
51,858	17,821	13,108	12,458	11,149	8,142	5,448	4.240	3,133	14,485	18,665	16,833	13,299
49,015	17,201	12,433	11,857	10,596	7,749	5.244	4,092	3,039	13,	17,836	15,982	15,198
46,098	16,431	11,771	11,220	9,977	7,359	**5, 021**	3,968	2,947	13,294	17,048	15,097	17,098
43,659	15,787	11,267	10,692	9,526	7,055	4,860	3,872	2,876	12,741	16,322	14,353	18,998
38,494	14,414	10,262	9,798	8,706	6,529	4,585	3,702	2,796	11,595	14,724	12 989	23,747
32,760	**12,828**	9,263	8,857	7,929	6,052	4,341	3,532	2,732	10,328	12.923	11^509	30,397
27,833	11,409	8,458	8,054	7,288	5.661	4,135	3,395	2,669	9,278	11,429	10,253	37,996
23,244	9,992	7,631	7,262	6,703	5,301	3,935	3,278	2,607	8,277	10,017	9,039	47,495
19,193	8,527	6,761	6,454	5,994	4,853	3,691	3,071	2,462	7,255	8,648	7,869	60,794
16,095	7.277	5,950	5,706	5,365	4,389	3,365	2,834	2.292	6, 70	7,506	6,862	75,992
13,626	6,192	5,180	4,988	4,701	3,895	3,029	2.558	2,100	5,545	6,492	5,947	94,990
	5,404	4,594	4.418	4,185	3,493	2,729	2,320	1,911	4,907	5,729	5,247	113,99
10,'592	4.809	4,133	3,985	3,767	3,167	2,491	2,125	1,756	4,413	5,137	4,720	132.99
9,560	4,324	3,758	3,626	3,425	2,890	2.274	1,950	1,620	4,006	4,654	4,286	151,98
8,698	3,953	3,442	3,323	3,144	2,658	2,095	1, 800	1,503	3,	4,251	3,921	170,98
7,992	3,649	3,184	3,074	2,908	2,459	1,943	1,671	1,398	3,379	3,913	3,619	189,88
7,386	3,387	2,962	**2.860**	2,706	**2,288**	1,813	1.559	1,306	3,136	3,628	3,362	208,98
6,858	3,160	2,769	2,674	2,529	2,139	1,700	1,462	1.225	2,925	3,378	3,139	227,98

Т а б л и ц ; 42.18. Пробег R, мг/см^, иоиов фтора ^P" в различных веществах [1]
Em • энергия на единицу массы падающей частицы; ***E*** — полная энергия

E Мэв/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	1 1						
0,0125	0,081	0,090	0,125	0,187	0,219	0,260	0,287	0,321	0,497	0,589	0,644	0,773	0,2375
0,0160	0,098	0,109	0,151	0,225	0,265	0,313	0,344	0,382	0,592	0,700	0,765	0,916	0,3040
0,0200	0,115	0,130	0,179	0,266	0,314	0,368	0,403	0,447	0,692	0,817	0,891	1,064	0,3800
0,0250	0,135	0,153	0,210	0,313	0,371	0,431	0,471	0,521	**0,806**	0,950	1,036	1.234	0,4749
0,0320	0,160	0,183	0,251	0,373	0,443	0,512	0,558	0,614	0,952	1,119	1,219	1,449	0,6079
0,0400	0,186	0,214	0,292	0,434	0,517	0,594	0,648	0,711	1,102	1,294	1,409	1,670	0,7599
0,0500	0,215	0,248	0,359	0,504	0,601	0,687	0,748	**0,820**	1,272	1,490	**1,621**	1,917	0,9499
0,0600	0,241	0,279	0,382	0,567	0,678	0,772	0,840	0,919	1,425	**1,666**	1,812	2,140	1,1399
0,0700	0,266	0,208	0,421	0,626	0,748	0,850	0,924	**1,010**	1,566	**1,828**	1.986	2,343	1,3299
0,0800	0,289	0,335	0,459	0,680	0,814	0,923	1,003	1,094	1,697	1,977	2,147	2,529	1,5198
0,0900	0,311	0,360	0,494	0,732	0,876	0,991	1,077	1,174	1,818	2,115	2,297	2,703	
0,1000	0,333	0,3^4	0,528	0,781	0,934	1,056	1,147	1,249	1,932	2,246	2,437	**2,866**	
0,1250	0,383	0,440	0,608	0,895	1.069	1,207	1,311	1,425	2,192	2,542	2,756	3.235	2,3747
0,1600	0,447	0,508	0,710	1.0S9	1,228	1,266	1,517	1,645	2,513	2,908	3,146	3,685	3,0397
0,2000	**0,516**	0,577	0,818	1,188	1,413	1,591	1,730	1,871	2,839	3,279	3,541	4,137	3,7996
0,2500	**0,598**	0,657	0,944	1,360	1,615	1,815	1,974	2,132	3.209	3,697	3.987	4,648	4,7495
0,3200	0,710	0,761	1,111	1,584	1,879	2,105	2,291	2,471	3,686	4,235	4,561	5,302	6,0794

Продол **о ю***ение табл. 42 1***3**

E **МэВ/а.е.м.**	Be	C	**Al**	Ti	Ni	Ge	Zr	**Ag**	Eu	Ta	Au	и	*E.* MSB
0,4000	**0,834**	**0,875**	**1,296**	**1,828**	**2,163**	**2,416**	**2,632**	**2,836**	**4,191**	**4,804**	**5,167**	**5,992**	**7,5992**
0,5000	**0,990**	**1,014**	**1,521**	**2,122**	**2,503**	**2,787**	**3,039**	**3,272**	**4,786**	**5,472**	**5,877**	**6,799**	**9,4990**
0,6000	**1,148**	**1,154**	**1,745**	**2,409**	**2,833**	**3,146**	**3,434**	**3,696**	**5,356**	**6,111**	**6,556**	**7,567**	**11,399**
0,7000	**1,309**	**1,298**	**1,969**	**2,693**	**3,159**	**3,500**	**3,825**	**4,115**	**5,914**	**6,735**	**7,217**	**8,312**	**13.299**
0,8000	**1,474**	**1,445**	**2,195**	**2,978**	**3,485**	**3,853**	**4,214**	**4,533**	**6,466**	**7,350**	**7,869**	**9,046**	**15,198**
0,9000	**1,644**	**1,598**	**2,424**	**3,265**	**3,811**	**4.204**	**4,604**	**4,951**	**7,013**	**7,960**	**8,514**	**9,772**	**17,098**
1.0000	**1,818**	**1,757**	**2,656**	**3,554**	**4.138**	**4,557**	**4,994**	**5,371**	**7,559**	**8,566**	**9,156**	**10,491**	**18,998**
1,2500	**2,275**	**2,179**	**3,256**	**4,290**	**4,968**	**5,450**	**5,984**	**6,436**	**8,926**	**10.084**	**10,761**	**12,285**	**23,747**
1,6000	**2,968**	**2,832**	**4,144**	**5,362**	**6,171**	**6,739**	**7,414**	**7,980**	**10,872**	**12,238^**	**13,040**	**14,828**	**30,397**
2,0000	**3,838**	**3,664**	**5,233**	**6,657**	**7,616**	**8,282**	**9,131**	**9,837**	**13,177**	**14,773**	**15,722**	**17,812**	**37,996**
2,5000	**5,044**	**4,818**	**6,711**	**8,390**	**9,539**	**10,330**	**11,418**	**12,303**	**16,200**	**18,092**	**19,225**	**21,687**	**47,495**
3,2000	**6,954**	**6,633**	**9,005**	**11,043**	**12,462**	**13,439**	**14,890**	**16,051**	**20,723**	**23,050**	**24,449**	**27.441**	**60,794**
4,0000	**9,451**	**8,987**	**11,949**	**14,409**	**16,148**	**17,356**	**19,248**	**20,768**	**26,334**	**29,181**	**30,896**	**34,533**	**75,992**
5,0000	**13,035**	**12,341**	**16,113**	**19,128**	**21,286**	**22,806**	**25,295**	**27,314**	**34,023**	**37,593**	**39,698**	**44,193**	**94,990**
6,0000	**17,128**	**16,154**	**20,816**	**24,417**	**27,023**	**28,873**	**32,022**	**34,587**	**42,510**	**46,839**	**49,352**	**54,734**	**113,99**
7,0000	**21,728**	**20,422**	**26,055**	**30,277**	**33,369**	**35,559**	**39,421**	**42,585**	**51,798**	**56,922**	**59,870**	**66,171**	**132,99**
8,0000	**26,836**	**25,145**	**31.829**	**36,707**	**40,321**	**42,872**	**47,484**	**51,306**	**61,856**	**67,846**	**71.246**	**78,520**	**151,98**
9,0000	**32,443**	**30,326**	**38,136**	**43,704**	**47,876**	**50,812**	**56,215**	**60,749**	**72,703**	**79,602**	**83,482**	**91,771**	**170,98**
10,0000	**38,548**	**35,968**	**44,977**	**51,263**	**56,034**	**59,373**	**65,624**	**70,898**	**84,347**	**92,188**	**96,561**	**105,919**	**189,98**
11,0000	**45,156**	**42,070**	**52,351**	**59,379**	**64,791**	**68,556**	**75,711**	**81,741**	**96,780**	**105,582**	**110,446**	**120,966**	**208,98**
12,0000	**52.262**	**48,631**	**60,257**	**68,056**	**74.141**	**78,352**	**86,467**	**93,273**	**109,989**	**119,774**	**125,154**	**136,920**	**227,98**

E МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	**Ne**	*AT*	Kr	Xe	Rn	**Майлар**		**Вода**	*E.* MSB
0,0125	**0,029**	**0,076**	**0,108**	**0,114**	**0,126**	**0,196**	**0,331**	**0,487**	**0,760**	**0,087**	**0,068**	**0,084**	**0,2375**
0,0160	**0,036**	**0,093**	**0,133**	**0,140**	**0,156**	**0,239**	**0,399**	**0,583**	**0,905**	**0,107**	**0,084**	**0,104**	**0,3040**
0,0200	**0,044**	**0,111**	**0,159**	**0,168**	**0,187**	**0,284**	**0,471**	**0,682**	**1,052**	**0,128**	**0,100**	**0,125**	**0,3800**
0,0250	**0,052**	**0,134**	**0,190**	**0.201**	**0.223**	**0,335**	**0,551**	**0,792**	**1,209**	**0,152**	**0,119**	**0,150**	**0,4749**
0,0320	**0,064**	**0,164**	**0,231**	**0,244**	**0,270**	**0,399**	**0,649**	**0,925**	**1,395**	**0,182**	**0,144**	**0,183**	**0,6079**
0,0400	**0,076**	**0,197**	**0,274**	**0,289**	**0,319**	**0,463**	**0,747**	**1,053**	**1,576**	**0,214**	**0,169**	**0,218**	**0,7599**
0,0500	**0,090**	**0,236**	**0,325**	**0,341**	**0,375**	**0,534**	**0,852**	**1,189**	**1,765**	**0,251**	**0,197**	**0,258**	**0,9499**
0,0600	**0,103**	**0,273**	**0,371**	**0 389**	**0,426**	**0,596**	**0,943**	**1,306**	**1,925**	**0,284**	**0,223**	**0,295**	**1,1399**
0,0700	**0,114**	**0,308**	**0.413**	**0,'432**	**0,472**	**0,652**	**1.025**	**1,409**	**2,066**	**0,314**	**0,247**	**0,328**	**1,3299**
0,0800	**0,125**	**0,340**	**0,452**	**0,473**	**0.514**	**0,703**	**1,099**	**1,502**	**2,191**	**0,342**	**0,269**	**0,359**	**1,5198**
0,0900	**0,135**	**0,370**	**0,489**	**0,510**	**0,553**	**0,749**	**1,167**	**1,587**	**2,305**	**0,369**	**0,290**	**0,388**	**1,7098**
0,1000	**0,145**	**0,398**	**0,522**	**0,545**	0,580	**0,793**	**1,230**	**1,667**	**2,413**	**0,394**	**0,310**	**0,415**	**1,8998**
0,1250	**0,165**	**0,461**	**0,598**	**0,623**	**0,672**	**0,890**	**1,371**	**1,844**	**2,651**	**0,451**	**0,354**	**0,475**	**2,3747**
0,1600	**0,190**	**0,534**	**0,687**	**0,715**	**0,768**	**1,005**	**1,539**	**2,054**	**2,934**	**0,520**	**0,409**	**0,545**	**3,0397**
0,2000	**0,213**	**0,603**	**0,771**	**0,803**	**0,861**	**1,118**	**1,704**	**2,261**	**3,215**	**0,588**	**0,462**	**0,612**	**3,7996**
0,2500	**0,237**	**0,677**	**0,862**	**0,897**	**0,961**	**1,243**	**1,888**	**2,495**	**3,531**	**0,664**	**0,523**	**0,683**	**4,7495**
0,3200	**0,267**	**0,767**	**0,972**	**1,012**	**1,086**	**1,404**	**2,127**	**2,801**	**3,948**	**0,761**	**0,599**	**0,771**	**6,0794**
0,4000	**0,297**	**0,859**	**1,087**	**1,133**	**1,219**	**1,579**	**2,391**	**3,139**	**4,413**	**0,865**	**0,681**	**0,861**	**7,5992**
0,5000	**0,333**	**0,967**	**1,224**	**1,277**	**1,379**	**1,795**	**2,718**	**3,560**	**4,990**	**0,991**	**0.779**	**0,969**	**9,4990**
0,6000	**0,368**	**1,072**	**1,361**	**1,421**	**1,540**	**2,015**	**3,051**	**3,985**	**5,573**	**1,117**	**0,877**	**1,076**	**11,399**
0,7000	**0,404**	**1,178**	**1,503**	**1,570**	**1,707**	**2,243**	**3,393**	**4,425**	**6,170**	**1,245**	**0,978**	**1,187**	**13,299**
0,8000	**0,441**	**1 286**	**1,652**	**1,727**	**1,882**	**2,482**	**3,748**	**4,881**	**6,785**	**1,379**	**1,082**	**1.302**	**15,198**
0,9000	**0,481**	**1!399**	**1,809**	**1,891**	**2,066**	**2,734**	**4,118**	**5,352**	**7,420**	**1,519**	**1,191**	**1,425**	**17,098**
1,0000	**0,524**	**1,517**	**1,974**	**2,065**	**2,261**	**2,997**	**4,503**	**5,837**	**8,073**	**1,665**	**1,305**	**1,554**	**18,998**
1,2500	**0,640**	**1,832**	**2,415**	**2,529**	**2,783**	**3,697**	**5,509**	**7,091**	**9,747**	**2,056**	**1,611**	**1,901**	**23,747**
1,6000	**0,827**	**2,321**	**3,097**	**3,243**	**3,583**	**4,755**	**6,999**	**8,930**	**12,152**	**2,664**	**2,093**	**2,445**	**30,397**
2,0000	**1,079**	**2,950**	**3,957**	**4,143**	**4.583**	**6,054**	**8,793**	**11,126**	**14,966**	**3,440**	**2,719**	**3,145**	**37,996**
2,5000	**1,453**	**3,840**	**5,140**	**5,386**	**5,944**	**7,789**	**11,149**	**13,974**	**18,568**	**4,525**	**3,608**	**4,133**	**47,495**
3,2000	**2,084**	**5,284**	**6,994**	**7,332**	**8,045**	**10,414**	**14,642**	**18,170**	**23,821**	**6,244**	**5,039**	**5,713**	**60,794**
4,0000	**2,950**	**7,217**	**9,395**	**9,840**	**10,730**	**13,712**	**18,961**	**23,329**	**30,226**	**8.484**	**6,929**	**7,785**	**75,992**
5,0000	**4,236**	**10,054**	**12,824**	**13,409**	**14,521**	**18,316**	**24,922**	**30,398**	**38,899**	**11,688**	**9,657**	**10,765**	**94,990**
6,0000	**5,732**	**13,344**	**16,725**	**17,463**	**18,811**	**23,475**	**31,540**	**38,208**	**48,398**	**15,337**	**12,778**	**14,172**	**113,99**
7,0000	**7,427**	**17,076**	**21.091**	**21,997**	**23,602**	**29,194**	**38,836**	**46,774**	**58,781**	**19,425**	**16,285**	**17,995**	**132,99**
8,0000	**9,318**	**21,247**	**25,917**	**27,001**	**28,897**	**35.480**	**46,827**	**56,117**	**70,057**	**23,948**	**20,174**	**22,223**	**151,98**
9,0000	**11,403**	**25,847**	**31,204**	**32,479**	**34,692**	**42,340**	**55,539**	**66,266**	**82,245**	**28,911**	**24,450**	**26,862**	**170,98**
10,0000	**13,683**	**30,853**	**36,948**	**38,427**	**40,980**	**49,776**	**64,962**	**77,229**	**95,363**	**34.315**	**29,111**	**31.909**	**189,98**
11,0000	**16,158**	**36,261**	**43,139**	**44,839**	**47,757**	**57,791**	**75,091**	**89,008**	**109,434**	**40,156**	**34,157**	**37.358**	**208,98**
12,0000	**18,829**	**42,072**	**49,777**	**51,714**	55,023	**66,384**	85.920	**101,596**	**124,464**	**46,432**	**39,586**	**43,210**	**227,98**

Таблица 4 5421.19. Х Массовая тормозная способность веществ, Л [МэВ/(мг/см2)] для указанных энергий (Продолжение)

— энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Ell	Ta	Au	и	ε, МэВ
0,0125	3,548	2,935	2,150	1,430	1,161	1,054	0,976	0,903	0,574	0,491	0,452	0,387	0,2499
0,0160	4,014	3,320	2,432	1,618	1,314	1,192	1,104	1,022	0,649	0,556	0,511	0,438	0,3199
0,0200	4,487	3,712	2,720	1,809	1,469	1,333	1,235	1,142	0,726	0,621	0,571	0,490	0,3998
0,0250	5,017	4,150	3,041	2,022	1,642	1,490	1,380	1,277	0,812	0 695	0,640	0,547	0,4998
0,0320	5,669	4,699	3,440	2,288	1,861	1,692	1,562	1,445	0,918	o'788	0,726	0,623	0,6397
0,0400	6,323	5,265	3,846	2,565	2,092	1,908	1,758	1,627	1,035	0,890	0,819	0,704	0,7997
0,0500	7,043	5,904	4,300	2,881	2,361	2,150	1,982	1,836	1,165	1,013	0,933	0,802	0,9996
0,0600	7,679	6,498	4,705	3,171	2,607	2,367	2,188	2,028	1,299	1,129	1,042	0,898	1,1995
0,0700	8,242	7,050	5,072	3,439	2,840	2,577	2,384	2,211	1,420	1,243	1,151	0,989	1,3994
0,0800	8,749	7,581	5,407	3,693	3,055	2,768	2,558	2,379	1,541	1,352	1,249	1,076	1,5994
0,0900	9,207	8,081	5,715	3^932	3,258	2,961	2,726	2,538	1,663	1,455	1,349	1,163	1,7993
0,1000	9,630	8,526	6,000	4,158	3,456	3,132	2,880	2,694	1,776	1,554	1,440	1,242	1,9992
0,1250	10,534	9,719	6,625	4,664	3,896	3,531	3,246	3,041	2,037	1,782	1,666	1,441	2,4990
0,1600	11,502	11,179	7,331	5,249	4,413	4,002	3,673	3,445	2,346	2,060	1,932	1,686	3,1987
0,2000	12,301	12,484	7,946	5,777	4,887	4,426	4,061	3,806	2,638	2,328	2,185	1,907	3,9984
0,2500	12,946	13,617	8,500	6,282	5,338	4,845	4,437	4,157	2,933	2,593	2,431	2,125	4,9980
0,3200	13,431	14,592	9,002	6,778	5,788	5,284	4,816	4,501	3,223	2,863	2,687	2,363	6,3974
0,4000	13,664	15,169	9,346	7,122	6,131	5,608	5,112	4,776	3,477	3,094	2,907	2,551	7,9968
0,5000	13,728	15,427	9,600	7,421	6,432	5,904	5,376	5,011	3,706	3,302	3,106	2,736	9,9960
0,6000	13,495	15,199	9,626	7,537	6,565	6,045	5,487	5,111	3,821	3,417	3,220	2,859	11,995
0,7000	13,214	14,833	9,582	7,570	6,621	6,104	5,529	5,155	3,890	3,478	3,287	2,913	13,994
0,8000	12,894	14,376	9,495	7,568	6,637	6,143	5,555	5,175	3,931	3,532	3,333	2,962	15,994
0,9000	12,589	13,912	9,381	7,524	6,632	6,154	5,554	5,169	3 968	3,565	3,368	3,002	17,993
1,0000	12,275	13,440	9,250	7,483	6,605	6,133	5,541	5,152	3',978	3,580	3,286	3,025	19,992
1,2500	11,526	12,343	8,886	7,287	6,487	6,043	5,447	5,056	3,972	3,581	3,386	3,030	24,990
1,6000	10,587	11,097	8,363	6,983	6,239	5,829	5,252	4,850	3,889	3,521	3,328	2,985	31,987
2,0000	9,664	10,085	7,800	6,607	5,936	5,569	4,992	4,625	3,744	3,416	3,229	2,909	39,984
2,5000	8,704	9,121	7,176	6,164	5,576	5,238	4,686	4,349	3,574	3,251	3,086	2,799	49,980
3,2000	7,661	8,092	6 443	5,605	5,103	4,800	4,304	3,982	3,325	3,041	2,886	2,622	63,974
4,0000	6,747	7,186	5,767	5,069	4,642	4,371	3,939	3,633	3,074	2,814	2,682	2,439	79,968
5,0000	5,885	6,309	5,100	4,519	4,162	3,927	3,539	3,274	2,805	2,560	2,453	2,239	99,960
6,0000	5,233	5,626	4,574	4,080	3,764	3,568	3,220	2,978	2,552	2,356	2,255	2,072	119,95
7,0000	4,704	5,082	4,148	3,717	3,435	3,265	2,954	2,734	2,365	2,174	2,087	1,921	139,94
8,0000	4,279	4,632	3,797	3,417	3,163	3,007	2,734	2,525	2,195	2,024	1,944	1,792	159,94
9,0000	3,932	4,255	3,502	3,162	2,931	2,791	2,539	2,350	2,049	1,891	1,817	1,681	179,93
10,0000	3,634	3,933	3,250	2,948	2,730	2,603	2,369	2,200	1,918	1,778	1,713	1,583	199,92
11,0000	3,378	3,660	3,033	2,760	2,560	2,441	2,223	2,071	1,807	1,680	1,622	1,495	219,91
12,0000	3,159	3,420	2,843	2,593	2,408	2,300	2,095	1,956	1,709	1,592	1,535	1,416	239,90

МэВ/а.е м.	и	He	N	o	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)^n$	Вода	ε, МэВ
0,0125	8,063	3,440	2,279	2,141	1,903	1,256	0,770	0,546	0,360	2,883	3,668	2,799	0,2499
C,0160	8,951	3,775	2,537	2,386	2,121	1,433	0,888	0,632	0,420	3,242	4,125	3,116	0,3199
0,0200	9,736	3,998	2,766	2,605	2,331	1,618	1,009	0,734	0,491	3,595	4,572	3,397	0,3998
0,0250	10,581	4,199	3,016	2,843	2,572	1,846	1,180	0,860	0,623	3,983	5,069	3,703	0,4998
0,0320	11,730	4,451	3,299	3,141	2,869	2,150	1,397	1,053	0,733	4,472	5,704	4,094	0,6397
0,0400	12,884	4,684	3,588	3,454	3,181	2,485	1,646	1,262	0,896	4,981	6,354	4,500	0,7997
0,0500	14,233	5,005	3,952	3,844	3,578	2,885	1,944	1,514	1,097	5,564	7,095	4,997	0,9996
0,0600	15,716	5,378	4,362	4,216	3,985	3,280	2,230	1,755	1,289	6,122	7,816	5,496	1,1995
0,0700	17,194	5,823	4,768	4,631	4,392	3,662	2,495	1,983	1,466	6,665	8,501	6,026	1,3994
0,0800	18,763	6,299	5,196	5,050	4,807	4,039	2,768	2,206	1,638	7,202	9,176	6,575	1,5994
0,0900	20,289	6,807	5,630	5,487	5,224	4,406	3,029	2,423	1,795	7,727	9,825	7,133	1,7993
0,1000	21,960	7,368	6,108	5,916	5,628	4,770	3,294	2,622	1,944	8,238	10,476	7,698	1,9992
0,1250	26,302	8,778	7,254	6,989	6,678	5 638	3,882	3,094	2,299	9,500	12,091	9,136	2,4990
0,1600	32,474	10,827	8,885	8,562	8,122	6 >66	4,640	3,695	2,742	11,194	14,221	11,216	3,1987
0,2000	39,016	12,952	10,608	10,187	9,631	7,827	5,324	4,227	3,123	12,825	16,274	13,390	3,9984
0,2500	46,070	15,249	12,368	11,909	11,118	8,789	5,942	4,658	3,426	14,399	18,250	15,708	4,9980
0,3200	53,471	17,455	14,196	13,548	12,396	9,497	6,337	4,942	3,610	15,861	20,146	17,986	6,3974
0,4000	58,319	19,253	15,290	14,533	13,159	9,823	6,495	5,056	3,682	16,757	21,337	19,402	7,9968
0,5000	61,248	20,352	15,811	15,043	13,459	9,898	6,528	5,098	3,715	17,213	21,974	20,179	9,9960
0,6000	61,122	20,502	15,516	14,746	13,177	9,635	6,391	4,986	3,648	16,960	21,763	19,896	11,995

МэВ/а.е.м.	н	Не	N	O	Ne	*Ат*	Кг	Хе	Rn	Майлзр		Вода	*Е.* МэВ
0,7000	58,833	20,218	14,871	14,133	12,648	9,237	6,180	4,810	3,555	16,433	21,119	19,097	13,994
0,8000	55,737	19,560	14.138	13,483	12,049	8,812	5,963	4,653	3,456	15,800	20,282	18,174	15,994
0,9000	52,534	18,725	13,415	13,786	11,370	8,387	5,722	4,522	3,358	15,151	19,428	17,205	17,993
1,0000	49,858	18,028	12,867	12,210	10,878	8.057	5,550	4,422	3.284	14,550	18,639	16,391	19,992
1,2500	44,165	16,538	11,774	11,241	9,988	7,491	5,261	4,240	3,208	13,303	16,893	14,902	24,990
1,6000	37,799	14,802	10,687	10,219	9,149	6,983	5,009	4,073	3,153	11,917	14,911	13,280	31,987
2,0000	32,292	13,237	9,812	9,344	8,455	6,568	4,797	3,939	3,097	10,764	**13,260**	11,895	39,984
2,5000	27,125	11,661	8,905	8,475	7,822	6,186	4,593	3,825	3,043	9,659	**11,690**	10 549	49,980
3,2000	22,550	10,019	7.944	7,583	7,042	5,702	4,336	3,608	2,893	8,524	10,160	9,245	63,970
4,0000	19,031	8,604	7.036	6,747	6,344	5,190	3,979	3,351	2,710	7,532	8,875	8,114	79,968
5,0000	16,218	7,369	6,166	5,936	5,595	4,636	3,606	3,045	2,499	6,599	7,726	7,079	99,960
6,0000	14,225	6,468	5,498	5,287	5,008	4,181	3,266	2,776	2,287	5,873	6,856	6,280	119,95
7,0000	12,736	5,783	4,970	4,791	4,530	3,808	2,995	2,555	2,112	5,306	6,177	5,675	139,94
8,0000	11,543	5,221	4,537	4,378	4,135	3,489	2,745	2,354	1,955	4,837	5,620	5,175	159.94
9,0000	10,540	4,790	4,171	4,027	3,810	3,222	2,539	2,182	1,821	4,440	5,151	4,752	179,93
10,0000	9,718	4,436	3,871	3,738	3,536	2,990	2,363	2,031	1,700	4,108	4,758	4,401	199,92
11,0000	9,007	4,130	3,612	3,488	3,300	2,790	2,211	1,901	1,592	3,824	4,425	4,100	219,91
12,0000	8,387	3,864	3.386	3,270	3,093	2,616	2,078		1,498	3,577	4,131	3,838	239,90

42.2. МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

В результате взаимодействия с атомным электроном заряженная частица, движущаяся в веществе, изменяет направление своего движения. В единичном акте взаимодействия угол отклонения, как правило, очень мал, но статистическое сложение углов отклонения при большом числе столкновений с атомными электронами приводит к тому, что параллельный пучок частиц пройдя некоторую толщу вещества, становится расходящимся пучком. Угловое распределение в пучке, т. е. зависимость потока от угла отклонения относительно первоначальной оси пучка, хорошо описывается распределением Гаусса

$$f = f_{„} \exp(-e v e g),$$

где F — поток под углом в; Fo — поток под углом 0° относительно оси пучка; Во — угол, под которым поток падает в е раз. Угол 6 называют углом многократного рассеяния, и в качестве характеристики размытия пучка пользуются углом во-

в современном виде теория многократного рассеяния изложена в работах [4, 5]. Параметрами теории являются величины

$$b = \ln [2730 (Z + \})Z^{\wedge}z4l(Af)] - 0,1544$$

В этих выражениях *г* и *Z* — атомные номера падающей частицы и рассеивателя; *А* — атомная масса рассеивателя; *t* — толщина рассеивателя, г/см^; *pv* — произведение импульса на скорость падающей частицы; P=i)/c (с — скорость света); (pv)'^^ {E^+2EMcЦ ^ и *E и Mc^* — энергия и масса покоя падающей частицы, МэВ.

Для определения угла многократного рассеяния Во, соответствующего спаду потока в е раз, нужно:

1) вычислить Хс и Ь;

2) по вычисленному значению *b* найти из графика на рис. 42.1 значение параметра к;

3) вычислить e=xxc, рад.

Таблица 42.20. Пробег ***R,*** мг/cmS ионов неона в различных веществах [1]

Ет — энергия на единицу массы падающей частицы; ***E*** — полная энергия

МэВ/а.е.м.	Бе	С	Al	Ti	Ni	Ge	**Zr**	**Ag**	Eu	Ta	Au	**и**	*Е.* МэВ
0,0125	0,079	0,087	0,121	0,181	0,212	0,253	0,279	0,312	0,483	0,573	0,626	0,753	0,2499
0,0160	0.096	0,107	0,147	0,220	0,257	0,305	0,335	0,373	0,577	0,683	0,745	0,894	0,3199
0,0200	0,114	0,127	0,175	0,260	0,306	0,360	0,394	0,437	0,676	0,798	0,871	1,041	0,3998
0,0250	0,133	0,151	0.207	0,307	0,362	0,423	0,462	0,511	0,790	0,930	1,014	1.210	0,4998
0,0320	0,158	0,181	0,247	0,367	0,434	0,503	0,549	0,604	0,935	1,100	1,198	1,424	0,6397
0,0400	0,184	0,211	0.289	0,428	0,509	0,586	0,638	0,701	1,085	1.274	1,387	1,645	0.7997
0,0500	0,213	0,246	0,336	0,498	0,593	0,679	0,739	0,811	1,255	1,470	1,600	1,893	0,9996
0,0600	0,240	0,277	0,379	0,562	0,670	0,764	0,831	0,910	1,409	1,647	1,791	2,116	1,1995
0,0700	0,265	0,306	0,418	0,620	0,740	0,842	0,915	1,001	1,550	1,808	1,965:	2,319	1,3994
0,0800	0,288	0,333	0,456	0,675	0,806	0,915	0,994	1,085	1,680	1,957	2,125	2,505	1,5994
0,0900	0,310	0,358	0,491	0,726	0,867	0,983	1,067	1,164	1,801	2,095	2,2741	2,678	1,7993
0,1000	0,331	0,382	0,525	0.775	0,925	1,047	1,137	1,239	1,914	2,224	2,414	2,840	1,9992
0,1250	0,381	0,437	0,604	0,888	1,059	1,195	1,297	1,410	2,171	2,517	2,729	3,204	2,4990
0,1600	0,444	0,504	0,704	1,029	1,225	1,378	1,497	1,623	2,482	2,876	3,111	3,645	3,1987
0,2000	0,511	0,571	0,808	1,174	1,395	1,566	1,701	1,841	2,802	3,236	3.495	4,084	3,9984

ГЛэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	и	£. МэВ
0,2500	0,591	0,648	0,930	1,340	1,588	1,781	1,935	2,090	3,158	3,638	3.924	4,575	4,9980
0,3200	0,696	0,747	1.089	1,553	1,839	2,057	2,237	2,413	3,612	4,151	4,470	5,198	6,3974
0,4000	0,814	0,854	1.263	1,783	2,107	2,351	2,558	2,757	4,089	4,687	5,041	5,849	7,9968
0,5000	0,960	0,985	**1.474**	2,058	2.425	2,698	2,939	3,165	4,645	5,312	5,706	6,605	9,9960
0,6000	1,107	1,115	**1,682**	2,325	2,733	3,032	3,307	3,560	5,176	5,907	6,338	7,319	11,995
0,7000	1,256	**1,248**	1,890	2,590	3,036	3,361	3,670	3,949	5,694	6,486	6,952	8,011	13,994
0,8000	1,410	**1,385**	2,100	2,854	3,337	3,687	4,031	4,336	6,205	7,056	7,556	9,692	15,994
0,9000	1,566	1,526	2,311	3,11^	3,639	4,012	4,390	4,723	6,711	7,620	8,152	9,362	17,993
1,0000	1,727	1,673	2,526	3,385	3,941	4,338	4,751	5,110	7,214	8,179	8,744	10,025	19,992
1,2500	2,147	2,061	3,077	4,062	4,704	5,158	5,660	6,089	8,471	9,574	10,220	11,675	24,990
1,6000	2,781	2,658	3,889	5,042	5,804	6,337	6,968	7,502	10,251	11,544	12,304	14,001	31,987
2,0000	3,572	3,415	4,879	6,220	7,118	7,741	8,530	9,190	12,347	13,850	14,743	16,714	39,984
2,5000	4,662	4,458	6,216	7,787	8,857	9,593	10,598	11,420	15,081	16,851	17,911	20,218	49,980
3,2000	6,379	6,089	8,277	10,171	11,483	12,387	13,718	14,787	19,145	21,306	22,604	25,389	63,974
4,0000	8,607	8,190	10,905	13,176	14,774	15,883	17,608	18,998	24,154	26,780	28,360	31,720	79,968
5,0000	11,786	11,165	14,599	17,361	19,330	20,717	22,971	24,805	30,973	34,240	36,166	40,287	99,960
6,0000	15,395	14,526	18,744	22,024	24,389	26,066	28,902	31,216	38,456	42,391	44,678	49,580	119,95
7,0000	19,429	18,270	23,340	27,164	29,955	31,930	35,391	38,231	46,602	51,235	53,904	59,612	139.94
8,0000	23,890	22,395	28,382	32,779	36,026	38,317	42,433	45,848	55,386	60,775	63,838	70,397	159,94
9,0000	28,768	26,902	33.869	38,865	42,598	45,223	50,028	54,062	64,822	71,002	74,482	81,923	179,93
10,0000	34,060	31,793	39,799	45,418	49,670	52,645	58,185	62,860	74,915	81,913	85,820	94,188	199,92
11,0000	39,770	37,066	46,171	52,432	57,237	60,580	66,901	72,230	85,660	93,487	97,819	107,191	219,91
12,0000	45,893	42,719	52,984	59,909	65,294	69,021	76,169	82,167	97,042	105,717	110,492	120,938	239,90

Бт МэВ/а.е.м.	и	Не	N	о	Ne	Ат	Кг	Хе	Rn	Майлар	№„	вода	Е. МэВ
0,0125	0,028	0,074	0,104	0,110	0,122	0,189	0,320	0,471	0,735	0,084	0,066	0,081	0.2499
0,0160	0,035	0,091	0,129	0,136	0,151	0,231	0,387	0,566	0.879	0,104	0,082	0,101	0,3199
0,0200	0,043	0,109	0,155	0,164	0,182	0,276	0,458	0,664	1.024	0,125	0,098	0,122	0,3998
0,0250	0.051	0,132	0,186	0,197	0,218	0,327	0,538	0,774	1,181	0,149	0,117	0,147	0,4998
0,0320	0,063	0,162	0,227	0,240	0,265	0,391	0,636	0,906	1,366	0,180	0,141	0,180	0,6397
0,0400	0,075	0,195	0,271	0,285	0,314	0,465	0,733	1,034	1,547	0,212	0,167	0,215	0,7997
0,0500	0,089	0,235	0,321	0,337	0,371	0,527	0,839	1,170	1,737	0,248	0,195	0,255	0,9996
0,0600	0,102	0,272	0,368	0,385	0,421	0,589	0,930	1,288	1,897	0,281	0,221	0,292	1,1995
0,0700	0,113	0,307	0,410	0,429	0.467	0,645	1,012	1,391	2,038	0,312	0,245	0,326	1,3994
0,0800	0,124	0,339	0,449	0,469	0,510	0,696	1,086	1,484	2,163	0,340	0,267	0,357	1,5994
0,0900	0,134	0,369	0,485	0,506	0,549	0,742	1,154	1,569	2,277	0,366	0,288	0,385	1,7993
0,1000	0,144	0,397	0,519	0,541	0,585	0,786	1,216	1,648	2,384	0,392	o! 308	0,412	1,9992
0,1250	0,164	0,459	0,594	0,618	0,666	0,882	1,355	1,823	2,620	0,448	0,352	0,471	2,4990
0,1600	0,188	0,530	0,681	0.709	0,761	0,995	1,520	2,030	2,898	0,516	0,405	0,540	3,1987
0,2000	0,211	0,598	0,763	0.794	0,851	1,105	1.680	2,232	3,171	0,582	0,458	0,605	3,9984
0,2500	0,234	0,669	0,850	0,885	0,948	1,225	1,858	2,457	3,476	0,656	0,516	0,674	4,9980
0,3200	0,262	0,754	0,955	0,994	1,067	1,378	2,085	2,747	3,873	0,748	0,589	0,757	6,3974
0,4000	0,291	0,841	1,064	1,108	1,192	1,543	2,334	3,067	4,311	0,846	0,666	0,843	7,9968
0.5000	0,324	0,942	1,192	1,243	1,342	1,746	2,641	3,460	4,850	0,964	0.758	0,944	9,9960
0,6000	0,357	1,040	1,320	1,377	1,492	1,950	2,950	3,856	5,393	1,080	0.849	1,043	11,995
0,7000	0,390	1,138	1,451	1,516	1,647	2,162	3,268	4,264	5,948	1,200	0.942	1,146	13,994
0,8000	0,425	1,239	1,589	1,661	1,808	2,384	3,597	4,687	6,518	1,324	1.039	1,253	15,994
0,9000	0,462	1,343	1,734	1,813	1,979	2,616	3,939	5,123	7,105	1,453	1.140	1,366	17.993
1,0000	0,501	1,452	1,886	1,973	2,159	2,859	4,294	5,570	7,707	1,588	1,245	1,485	19,992
1,2500	0,608	1,741	2,292	2,399	2,638	3,502	5,219	6,723	9,246	1,947	1,526	1,805	24,990
1,6000	0,779	2,189	2,916	3,052	3,370	4,470	6,582	8,405	11,446	2,503	1,967	2,302	31,987
2,0000	1,008	2,760	3,697	3,871	4,280	5,651	8,213	10,401	14,005	3,209	2,536	2,939	39,984
2,5000	1,346	3,566	4,768	4,995	5,510	7,220	10,344	12,977	17,262	4,191	3,340	3,832	49,980
2,2000	1,913	4,863	6,434	6.743	7,398	9,579	13,482	16,748	21,982	5,735	4,626	5,251	63,974
4,0000	2,686	6,588	8,577	8,983	9,795	12,523	17,338	21,353	27,699	7,735	6,313	7,101	79,968
5,0000	3,827	9,105	11,618	12,148	13,157	16,606	22,624	27,622	35,392	10,576	8,732	9,744	99,960
6,0000	5,145	12,005	15,057	15,722	16,940	21,154	28,459	34,508	43,766	13,792	11,484	12,746	119,95
7,0000	6,633	15,279	18,887	19,699	21,142	26,171	34,858	42,022	52,873	17,378	14,560	16,101	139,94
8,0000	8,283	18,921	23,101	24,068	25,766	31,660	41,837	50,180	62,721	21,329	17,956	19,793	159,94
9,0000	10,098	22,922	27,701	28,834	30,807	37,628	49,416	59,009	73.324	25,646	21,675	23,828	179,93
10,0000	12,074	27.262	32,680	33,990	36,258	44,074	57,584	68,513	84.695	30,330	25,717	28,203	199,92
11,0000	14,213	31,935	38,030	39,531	42,114	51,000	66,337	78,691	96.855	35,378	30,077	32,913	219,91
12,0000	16,514	36.942	43,750	45,455	48,375	58,405	75,668	89,539	109,805	40,786	34,755	37,955	239,90

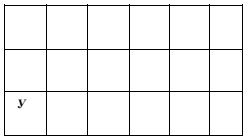


Рис. 42.1. Связь между параметрами х и Ь, используе-- мымн при расчете угла многократного рассеяния

Рис. 42.2. Пробег электронов в алюминии

/

10-' Z J ¥567810° Z 3 ¥5B78m^ Z 3 ¥5e78iO^ 2 J ¥567810^ Z 3 ¥ ^ 6

*Пробег i Mi/cu^*

42.3. ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Электроны, проходя черел вещество, теряют энергию, главным образом, на ионизацию, возбуждение атомов вещества и на тормозное излучение. В каждом акте взаимодействия с атомными электронами для падающего электрона велика вероятность потерять существенную долю своей энергии и выбыть из пучка вследствие рассеяния на большой угол. Поэтому для электронов нет понятия среднего пробега в веществе, а говорят лишь о максимальной глубине проникновения (или экстраполированном пробеге). Достаточно точной теории, позволяющей получить формулу потерь энергии для электоонов, нет.

Для оценки глубины проникновения моноэнергетического пучка электронов пользуются эмпирическими формулами. Например, для пробега R (мг/смг) электронов в алюминии в [6] рекомендована формула

$$=412[£']«.\ 0{,}01 < £ < 3\ \text{МэВ},$$

где rt= 1,265—0,0954 1n£ (МэВ); ;?=530 £—106 мг/см^; 3<£<20 МэВ.

Построенный на основе этих формул график приведен на рис. 42.2. Поскольку экстраполированный пробег, мг/см^, слабо зависит от вещества, этим графиком можно пользоваться для оценки пробегов электронов и в других веществах, вводя поправку с помощью соотношения

$$^x = (Z/A)^$$

где ***P*** и ***Z/A*** — пробег и отношение заряда к массе для Al и элемента ***x***.

На рис. 42.3 приведен график [7] удельных потерь энергии электронов для кремния — материала, широко используемого для изготовления детекторов излучений. Из этого же графика можно получить удельные потери энергии электронов в других веществах. Для этого значение потерь, полученное из графика, следует умножить на отношение плотности данного вещества к плотности кремния (2,33 г/см^).

Электроны, родившиеся при р-распаде радионуклидов, обладают сплошным энергетическим спектром с максимальной энергией £юах. При прохождении через вещество пучок ^-частиц ослабляется приблизительно по экспоненциальному закону:

$$£ = £o\ \exp$$

где а;-^толщина поглотителя, г/см^; jim —массовый коэффициент поглощения электронов, см^/г, приближенно представляемый в виде Цш=15,5 £-••«1 см^/г [8].

42.4. ПРОХОЖДЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

I I

При прохождении у-излучения через вещество наиболее интенсивно протекают три процесса: фотоэффект, комптон-эффект и рождение электронно-позитронных пар. Каждый из этих процессов приводит к удалению фотона из пучка. Поэтому ослабление узкого пучка моноэнергетнческих фотонов описывается экспонентой

$$£ = £\,o\ \exp\ (—(x_{„}д;),$$

где ж —толщина вещества, г/см^; —массовый коэффициент ослабления, см^г.

Массовые коэффициенты ослабления для различных веществ приведены на рнс. 42.4 [9], а зависимости толщины защиты из различных материалов от кратности ослабления и энергии у-излучения — в табл. 42.21—42.24.

*Z J ^tSBJB 10"' Z 3 ¥ 5B78 10° Z 3 ¥5S 10^*
Энергия электронов, МэВ

Рис. 42.3, Удельные потери энергии электронов
НИИ

Таблица 42.21. Толщина защиты из свинца, мм, в зависимости от кратности ослабления и энергии 7-излучеиия (широкий пучок) [8]

ность ослаб-ления	Энергия f-излучения, МэВ															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0.5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2	3	4	6	ш
2	1	2	3	4	5	7	8	10	11,5	13	17	20	21	20	16	13,1
5	2	4	6	9	11	15	19	22	25	28	38	43	46	45	38	30
10	3	5,5	9	13	16	21	26	30,5	35	38	51	59	65	64	55	42
30	3,5	7	11,5	17	23	30	36,5	43	49,5	55	73	85	93	92	80	63
100	5	10	16	23	30	38,5	47	55	63	70	96,5	113	122	121	109	87
500	6,5	14	22	31	40	51	61	72	82	92	129	150	163	161	149	119
103	7	15	24	33	44	57	69,5	81	92	102	141	165	160	178	165	133
5 • Ю¶	9	19	30	42	55	70	85	99	112	124	170	198	219	217	203	166
10«	10,5	21	33	45,5	59	75	91	106	120	133	183	213	236	234	220	180
5-10^	11,5	23,5	37	52	69	87	105	123	140	156	214	247	263	272	258	215
108	11,5	24	38	54	72	92	111	130	148	165	227	262	289	289	275	229

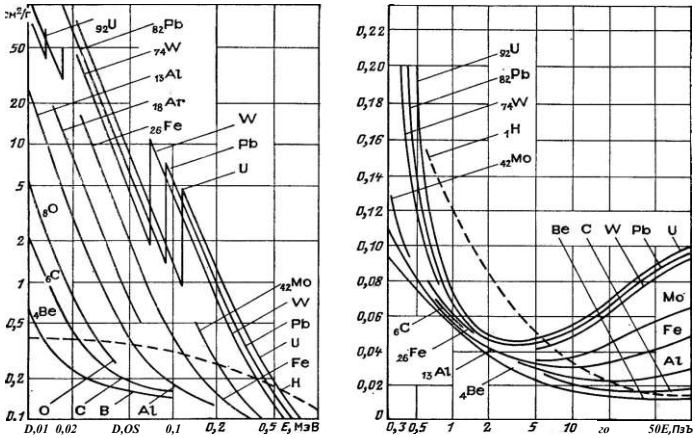


Рис. 42.4. Массовый коэффициент ослабления узкого пучка Y-излучения в различных веществах в зависимости от энергии •у-излучения

Таблица 42.22. Зависимость толщины защиты из железа от кратности ослабления и энергии 7-излучеиия (широкий пучок) [8]

ность вслаб-	Толщина защиты, см, при Е-. , МэВ															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1.5	2,0	3,0	4	6	10
2	0,7	1,2	1,7	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,6	3,9	4,4	4,5	4,6	3,4
5	1,4	2,5	3,4	4,1	4,8	5,1	5,5	5,7	6,1	6,4	7,4	8,1	8,9	9,4	9,6	8,0
10	1,9	3,5	4,6	5,6	6,3	6,8	7,3	7,7	8,1	8,5	10,0	11,0	12,2	12,6	13,2	1Г,4
30	2,4	4,5	6,2	7,9	8,5	9,2	9,8	10,4	10,9	11,4	13,6	15,1	17,0	17,7	18,8	17,0
100	3,4	6,1	8,1	9,6	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,5	17,3	19,5	22,1	23,3	25,0	23,1
500	4,4	7,7	10,1	12,0	13,7	14,9	16,0	17,0	17,9	18,7	22,3	25,0	28,8	30,6	32,7	31,2
Ю"	4,5	8,2	11,0	13,2	15,0	16,3	17,5	18,6	19,6	20,5	24,4	27,5	31,7	33,7	36,0	34,6
5 - 103	5,6	10,1	13,4	15,8	17,7	•19,3	20,7	22,0	23,2	24,3	29,4	33,3	38,2	40,7	43,2	42,2
10^	6,8	11,5	14,2	17,1	19,0	20,7	22,3	23,6	24,9	26,0	31,3	35,5	40,9	43,7	46,5	45,2
5 • 10«	8,6	13,8	17,0	19,6	21,8	23,6	25,2	26,9	29,4	29,9	35,9	40,8	47,2	50,4	55,0	53,0
Ю=5	10,0	15,8	18,2	20,8	23,0	24,9	26,7	28,4	30,0	31,5	38,0	43,2	**50,0**	53,4	58,3	56,1
10"	12,8	17,9	21,4	24,2	26,7	28,9	31,2	33,3	35,2	37,0	44,7	50,6	**58,8**	63,3		67,0
10'	15,0	20,3	24,3	27,6	30,5	33,2	35,8	38,1	40,2	42,4	51,3	57,9	67,5	73,1	79И	78,0

Таблица 42.23. Зависимость толщины защиты из бетона от кратиости ослабления и энергии -у-излучения (широкий пучок) [8]

, см, при E^ , МэВ

ослаб-ления	0,1	0.2	0,3	0.4	0.5	0.6	0.7	0,8	0,9	1.0	1.5	2	3	4	6	10
2	4,7	7,6	9,9	11,3	12,3	12,4	12,4	12,6	12,7	12,9	13,6	14,1	15,3	16,4	18,8	18,8
5	5,6	11,0	15,5	18,8	21,1	21,8	22,3	22,6	23,0	23,5	25,8	28,2	32,9	35,2	38,7	39,9
10	8,2	14,6	19,7	23,7	25,8	26,8	27,6	28,4	29,1	29,9	34,0	37,6	43,4	47,5	51,6	54,0
30	8,5	16,4	22,8	27,7	32,9	34,8	36,4	37,8	39,2	40,5	46,5	51,6	59,9	65,7	71,6	78,1
100	11,5	21,1	48,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5	58,3	65,7	77,5	84,5	95,1	105,1
500	13,8	24,6	35,2	43,9	50,5	54,5	57,3	58,8	62,5	64,6	74,8	84,5	101,0	110,4	124,4	139,7
103	15,5	28,2	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	76,8	70,4	81,7	92,7	110,9	120,9	137,9	155,0
5-103	18,8	33,1	45,6	56,4	65,7	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	97,4	119,9	132,7	146,8	166,7	186,7
10^	21,8	35,2	48,5	60,3	69,3	74,7	79,1	82 9	85,2	89,2	104,5	118,6	143,2	156,7	179,0	201,3
5-10«	23,3	42,3	56,4	68,6	78,1	83,4	88,7	93^	97,9	102,1	120 ,4	136,2	164,9	181,6	206,6	233,6
10=	30,5	50,5	64,6	75,1	82,8	83,3	93,5	98,1	102,5	106,8	126,6	144,4	173,8	191,4	218,4	248,9
10«	49,3	66,4	79,8	89,9	97,4	103,7	109,2	114,1	119,5	124,4	149,8	171,4	205,4	225,4	260,6	295,8
10'	64,0	84,9	15,7	130,7	110,3	117,4	123,6	130,0	136,2	142,0	170,8	194,9	236,0	259,4	299,4	340,5

Таблица 42.24. Зависимость толщины защиты из воды от кратиости ослабления и энергии if-излучения (широкий пучок) [8]

, см, при E^ . МэВ

Кратность ослабления	0,1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1,0	1.5	2	3	4	6	10
2	18	27	30	30	29	28	27	27	26	26	28	33	37	38	40	45
5	27	37	42	44	46	46	47	47	48	48	53	59	69	74	85	98
10	35	47	52	55	57	58	60	61	62	63	71	79	92	101	116	135
30	45	58	65	69	73	75	77	79	81	82	96	107	124	140	**163**	192
100	53	70	79	84	88	92	95	98	101	104	120	136	160	182	**212**	253
500	66	85	96	104	110	116	120	124	128	132	153	173	206	234	277	334
10=	72	92	104	113	118	124	129	134	138	143	167	189	226	257	306	**368**
5 • 10»	81	105	120	130	138	147	154	160	165	170	198	225	271	309	368	**446**
10^	91	114	128	139	147	155	162	168	175	181	212	241	290	331	396	480
5 _ 10»	103	128	144	156	167	175	183	190	196	205	241	276	334	383	460	554
105	ПО	135	152	164	175	184	192	201	204	216	255	292	353	404	487	587
Ю»	128	156	176	192	205	215	224	233	243	253	299	342	415	479	571	**695**
10'	150	178	200	217	232	243	255	265	277	288	344	393	478	554	657	**807**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Northclifte L. e., Schilling R. F.//Nuclear Data Tables. 1970. Vol. A7. P. 233—273.

2. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975.

3. Пучеров Н. Н., Романовский С. В., Чесноко-ва Т. Д. Таблицы массовой тормозной способности и пробегов заряженных частиц с энергией 1—100 МэВ. Киев: Наукова думка, 1976.

4. Nigam B. P., Sandersan M. K., Wu T.-W.//Phys. Rev. 1959. Voll. 115. P. 491—498.

5. Marion I. B., Zimmerman B. A.//Nucl. Instrum. and Methods. 1967. Vol. 51. P. 93—97.

6. Kat2 L., Penfold A. S.//Rev. Mod. Phys. 1952. Vol. 24. P. 28—35,

7. Marion I. B., Young F. C. Nuclear Reaction Analysis: Graphs and Tables. Amsterdam: North Holland Publishing Co., 1968.

8. Аглинцев К. К., Кодюков В. М. Прикладная дозиметрия. М.: Госатомиздат, 1962.

9. Прайс В., Хортон К., Спинни К. Зашита от ядерных излучений. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.

ГЛАВА 43
КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

В. С. Птускин

43.1. ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Космические лучи (КЛ) — элементарные частицы и атомные ядра высоких энергий космического происхождения. К космическим лучам также относят частицы, рожденные в атмосфере Земли первичными КЛ в результате взаимодействий с ядрами атомов воздуха. Наблюдаются КЛ с энергиями иа одну частицу от 108 до 10Ω» эв

Основная доля падающих на границу атмосферы КЛ имеет галактическое происхождение (галактические КЛ). Источниками этих частиц являются сверхновые и их остатки (включая нейтронные звезды) [1,2]. Часть КЛ (в основном с энергиями 108—108 эВ) приходит к Земле от Солнца. Солнечные КЛ ускоряются во время сильных хромосферных вспышек и других активных процессов на Солнце [3]. Частицы самых высоких наблюдаемых энергий (£'>10"-f-10'® эВ), возможно, имеют внегалактическое происхождение. Они ускоряются в активных галактиках [2]. Источником электронов с энергиями £<3-10^ эВ в межпланетной среде является магнитосфера Юпитера [4]. При энергиях 108—108 эВ обнаружена так называемая аномальная ядерная компонента КЛ. Эти частицы ускоряются во внешних областях гелиосферы — на внешних границах области, занятой солнечным ветром [5].

Единицей интегральной плотности потока КЛ / служит с-1-м-2.ср-'. Энергия частицы ***E*** измеряется в электрон-вольтах, для ядер используют также величину *г=E/A,* эВ/нуклон, — энергию на нуклон (Л — атомный номер ядра). *Жесткость* заряженной частицы с импульсом *р,* кг-м/с, и зарядом 2е, Кл, равна *R=pclZe-,* обычно R измеряют в вольтах. Импульс частицы, эВ/с (с —скорость света), численно равен жесткости в вольтах, если частица однозарядна, т. е. 2=1. Ниже приведены общие сведения о КЛ [6]:

Плотность потока КЛ вне области влияния магнитного поля Земли, с-^-м"^	$(3 \div 6) \cdot 10^3$
Концентрация первичных КЛ в межзвездном пространстве, м-з	10^{-4}
Плотность энергии первичных КЛ в межзвездном пространстве, Дж/м^'	$1{,}6 \cdot 10^{-13}$
Плотность пар ионов, образуемых КЛ на уровне моря (в среднем), с-i-m-^	$1{,}6 \cdot 10^6$
Общая мощность КЛ, достигающих поверхности Земли, Вт.	4-108

43.2. ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Приведем параметры галактической модели происхождения КЛ [2]:

Полная мощность галактических источников КЛ, Вт.	
Высота галактического гало КЛ (область захвата КЛ в Галактике), кпк (1 пк гь ж3 - Юie м).	.l—10
Время удержания КЛ в Галактике, лет . .	Ю'—Ю"
Средняя толща вещества, проходимая КЛ в Галактике, кг/м^.	.50—100

Плотность потока КЛ в зависимости от энергии частиц показана иа рис. 43.1—43.4. Характерна степенная зависимость *I (Е).* Наблюдаемый у Земли энергетический спектр КЛ в области малых энергий меняется в зависимости от уровня солнечной активности (см. §43.3).

Первые наблюдения антипротонов в составе КЛ [12—14] показали, что плотность потока антипротонов составляет по отношению к плотности потока протонов (6,8±1,7)-10-' при 4,4<£<13,4 ГэВ [13] и (0,6 . 10-< при а2<£<2,0 ГэВ [14], что возмож-

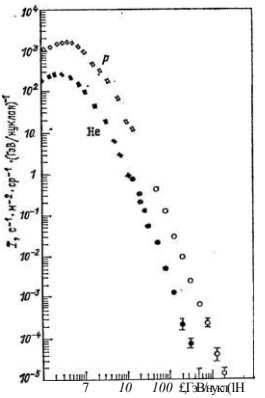


Рис 43.1. Спектры протонов и ядер Не в КЛ [7]

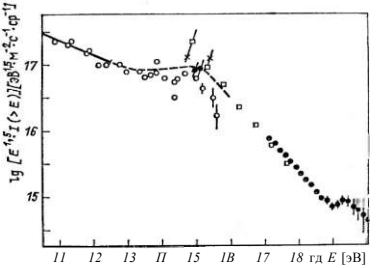


Рис. 43.2. Спектр КЛ высоких энергий [8]

но в 2—3 раза превышает ожидаемую плотность потока вторичных антипротонов, рождающихся при взаимодействии КЛ с ядрами межзвездного газа. Абсолютная плотность потока антипротонов на границе атмосферы равна (3,8±0,95) • 10-2 с-'-м^-ср-'-ГэБ"» при 4,7<£< <11,3 ГэВ [13].

Детальная информация о составе ядер в КЛ получена лишь для энергий частиц до 10 ГэВ/нуклон [151

Плотность потока различных ядер в составе а с энергиями 600—1000 МэВ/нуклон на границе атмосферы по измерениям, выполненным в сентябре 1977 г. [161, составляет:

	I, с-'М-2.ср-t	*I.* С-» м-г-ср-!
He	54.08 (1.10)	0,202 (4)
C	1,52(3)	0,0467(19)
N	0,42(1)	0,0205 (12)
O		0,0323(15)
Ne	012^(5)	0,0240(15)
Na	0,51 (2)	0,142 (4)
Mg	**0,282 (6)**	0,0074 (9)
Al	0,056 (2)	

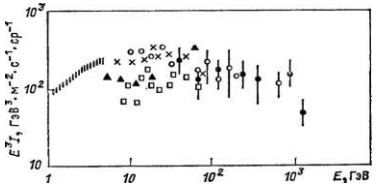


Рис. 43.3, Энергетический спектр электронной компоненты КЛ [9, 10]

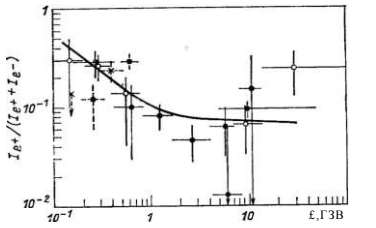


Рис. 43.4. Относительная плотность потока релятивистских позитронов в КЛ [II], Эти позитроны вторичны, т. е. возникают в основном при распадах г1+-мезонов, рождающихся при взаимодействии протонно-ядерной компоненты КЛ с атомными ядрами межзвездного газа

Высокое содержание в составе КЛ ядер Li, Be, B, элементов с зарядом ядра 21<:Z<25 и других редких в природе элементов и их изотопов (рис. 43.5, 43.6) объясняется тем, что они вторичны — возникают при фрагментации более тяжелых ядер, взаимодействующих с атомными ядрами межзвездного газа. Доля вторичных ядер уменьшается с энергией (рис. 43.7), что связано с соответствующим уменьшением времени удержания КЛ в Галактике. Определенный с учетом поправки на фрагментацию состав первичных ядер КЛ в источниках приведен в табл. 43.1.

Таблица 43.1. Относительный состав первичных КЛ в галактических [20] и солнечных [21| источниках КЛ. Концентрация ядер кремния условно принята за 100 единиц

Элемент	Источники галактических КЛ	Солнечные КЛ
H	**77 000 (9000)**	**41 600 (2000)**
He	**11 500 (1000)**	**2700 (81)**
C	**465 (40)**	**80 (22)**
N	**120 (10)**	**62 (76)**
O	**525 (50)**	83 (23)
Ne	62 (5)	8,7 (3.2)
Na	9 (3)	124 (25)
Mg	ПО (7)	9,4 (3.8)
Al	14 (3)	**100**
Si	**100**	**23 (12)**
S	14 (3)	4,1 (2)
Ar	4 (2)	**7,9 (39)**
Ca	7 (2)	**106 (39)**
Fe	**92 (12)**	**5,2 (2.6)**
Ni	4,8 (0.6)	

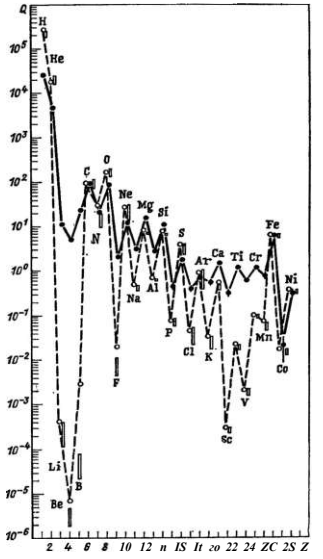


Рис. 43.5. Относительное содержание Q элементов от H до Ni; концентрация ядер C принята за 100 единиц: темные кружки — наблюдаемые у Земли КЛ с энергиями 70—280 МэВ/нуклон, светлые кружки — Солнечная система (в среднем); прямоугольники — локальная окрестность Галактики (17]

Для определения возраста КЛ в Галактике используется радиоактивный нуклид '®Be. Доля нераспавшегося нуклида '"Be составляет в КЛ 0,14±0,07 при энергии частиц е«200 МэВ/нуклон [22].

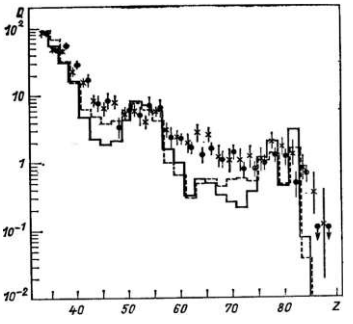


Рис. 43.6. Относительное содержание Q элементов с зарядом ядра 2>30, нормированное на 10" (концентрация железа):

кружки и крестнкн — в составе КЛ; сплошная линия — в Солнечной системе: пунктир — ожидаемое содержание в том случае. если бы состав КЛ в источниках совпадал со средним составом вещества в Солнечной системе и средняя толща проходимого в межзвездной среде вещества составляла 55 *кг/м²* [18]

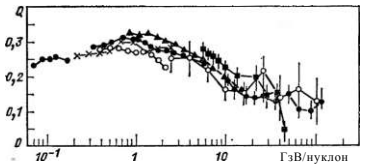


Рис. 43.7. Отношение потоков ядер B и C как функция энергии [19]

Отклонение углового распределения потока галактических КЛ от изотропного иллюстрирует рис. 43.8.

43.3. МОДУЛЯЦИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Наличие в межпланетном пространстве регулярных и случайных магнитных полей солнечного происхождения приводит к модуляции КЛ — пространственным и временным изменениям их интенсивности [24—26] (класс 11а в табл. 43.2; рис. 43.9, 43.10, *а. б).*

Измерения на космических аппаратах до расстояний от Солнца более 30 а.е. (1 а.е=1,496-10" м) обнаруживают в плоскости эклиптики радиальный градиент интенсивности галактических КЛ в межпланетной среде с типичными значениями 3-10-= (а.е.)-' в период мак-

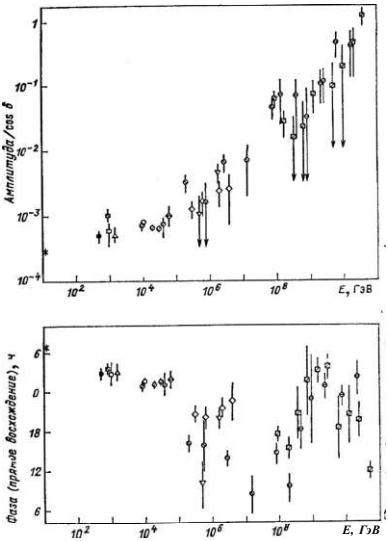


Рис. 43.8. Анизотропия КЛ, определенная с помощью гармонического анализа скорости счета детекторов КЛ по звездному времени. Приведены амплитуда и фаза первой гармоники (6-географическая широта, на которой проводились соответствующие наблюдения) [23]

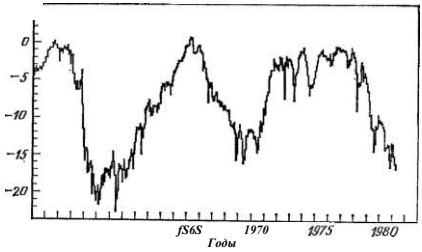


Рис. 43.9. Вариации относительной плотности потока ядерной компоненты галактических КЛ по усредненным за 27 дней показаниям нейтронного монитора станции Клаймакс (географическая широта 39,37°, долгота 253,82"). Средняя энергия первичных КЛ за пределами атмосферы примерно равна 6 ГэВ/нуклон За нулевой уровень выбрана плотность потока в период минимума солнечной активности (1954 г.) [27]

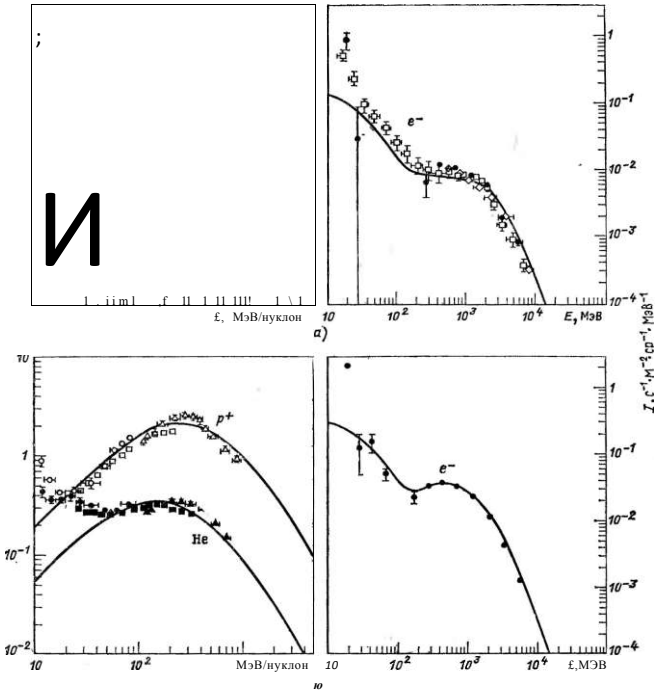


Рис. 43.10. Энергетические спектры КЛ (а) — 1969 г. и минимума (б) — 1977 г. солнечной

симума солнечной активности и 1,5-10-2 (а.е.)-' в минимуме солнечной активности (для е~1 ГэВ/нуклон) [27]. Понижение интенсивности КЛ во внутренних областях Солнечной системы обусловлено взаимодействием КЛ с неоднородностями магнитного поля, движущимися от Солнца вместе с солнечным ветром (потоком плазмы из атмосферы Солнца). Эффективный размер области модуляции галактических КЛ в межпланетной среде оценивается в 50—100 а.е. (в плоскости эклиптики).

43.4. СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Основную долю солнечных КЛ составляют протоны. Для мощных солнечных вспышек отношение потоков протонов и ядер гелия примерно равно 50 при энергиях десятки мегаэлектрон-вольт на нуклон. Суммарная энергия ускоренных во вспышке частиц достигает 1025 дж. Зарядовый состав ускоренных частиц, их полная энергия и вид энергетического спектра существенно изменяются от вспышки к вспышке. Дифференциальный спектр частиц по модулю импульса имеет степенной (с типичным показателем степени 3—7) или экспоненциальный вид. На орбите Земли поток солнечных КЛ обычно достигает максимального значения через 8—16 ч после начала вспышки и заметно уменьшается через 30—32 ч (см. подробнее [3, 26. 30]).

Вспышки КЛ, сопровождающиеся испусканием протонов с энергиями более 500 МэВ и дающие эффект на уровне земной поверхности, были зарегистрированы в течение 1942—1984 гг. примерно 40 раз. Эти вспышки происходят, как правило, в периоды изменения солнечной активности, но не в моменты ее максимума. Протонные вспышки с энергиями частиц $10 < £ < 100$ МэВ регистрируются в верхних слоях атмосферы значительно чаще. Протонные вспышки на Солнце сопровождаются

Таблица 45.10. Характеристики спутников и их орбит [11] (в скобках указаны неустоявшиеся названия)

		в ///, %			
		Мезонная	Нейтронная компонента	в стратосфере и за границей атмосферы	
	Сезонные	5	1	-	Изменение поглощения и распада вторичных частиц в земной атмосфере в связи с изменением метеорологических условий (температуры, давления) над пунктом наблюдения. Флуктуации атмосферных условий
	Суточные (маскируют аналогичные вариации III класса)	0,1-0,2%/к			
	Температурный эффект	0,1—0,2%/К	0,02%/К	-	
	Барометрический эффект	(1 3) X X10-3%/Па	7-10-3%/Па		
П. Изменение геомагнитного порога обрезания КЛ	Возрастанне в период главной фазы магнитной бури на фоне основного понижения	3	10	Непосредственное наблюдение изменения геомагнитного порога	Влияние вариаций токовых систем и магнитесферы на траектории КЛ и изменение геомагнитного порога обрезания КЛ
	Солнечно-суточные (локальный источник)	I	3		Асимметрия в изменении геомагнитного порога обрезания
	11-летние	1 »	20	100	Рассеяние галактических КЛ на неоднороднвстях магнитного поля солнечного ветра. Изменения активности Солнца. Инверсия общего магнитного поля Солнца
	22-летние [29]	0,5	1—2	10	Асимметрия в потоке неоднородностей солнечного ветра и секторная структура межпланетного магнитного поля
	Со спорадическим периодом 7—35 суток	0,5	1 - 2	10	Анизотропия, вызываемая воздействием на КЛ электромагнитных полей в межпланетной среде
	Солнечно-суточные	0,2-0,3	0,5	2	
	Эффект Форбуша (понижение во время магнитной бури)	10	30	50	Взаимодействие КЛ с ударными волнами в межпланетной среде
	Возрастание перед эффектом Форбуша	1	2	-	Увеличение энергии КЛ, отражающихся от переднего фронта движущейся к Земле ударной волны
	Большие возрастания ' интенсивности КЛ, связанные с мощными хромосферными вспышками на Солнце (значения приводятся для события 23.02.1956)	400	. 5000	В тысячи раз выше нормального уровня	Ускорение частиц в области солнечной вспышки с последующим распрэстранеинем от Солнца
	Малые возрастания, связанные с обычными хромосферными вспышками	0,1-0,2	1	В десятки и сотни раз выше нормального уровня	
	Возможные аномальные длительные возрастания потока КЛ (характерные времена 10^—10® лет)	103-10«			Вспышки сверхновых на расстоянии примерно 20 пк от Солнца
	Звездно-суточная вариация	0,1 (в минимуме солнечной активности)			Диффузия КЛ из Галактики, пекулярное движение Солнечной системы, потоки КЛ от отдельных близких галактических источников

испусканием быстрых электронов ($E > 30$ кэВ, плотностью потока до 10^8 с$^{-1}$·м$^{-2}$·ср$^{-1}$).

Средняя по времени мощность КЛ от Солнца составляет 10^{11} Вт.

Связанные с генерацией быстрых частиц на Солнце вариации интенсивности КЛ у поверхности Земли указаны в табл. 43.2 (см. класс III б).

43.5. ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Действие земного магнитного поля приводит к изменению первоначальных траекторий КЛ [31]. В результате возникает эффект геомагнитного обрезания КЛ: для каждой геомагнитной широты Земли с данного направления могут приходить частицы с жесткостью R, превышающей пороговое значение (табл. 43.3). Значение жесткости R, В, определяет траекторию заряженной частицы в магнитном поле. Радиус, м, кругового движения заряженной частицы в однородном магнитном поле *B*, Тл, составляет $r = 3{,}34 \cdot 10^{-8} RIB$.

Вариации интенсивности КЛ геомагнитной природы указаны в классе И табл. 43.2.

43.6. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Слой атмосферного воздуха для падающих из космоса быстрых частиц эквивалентен примерно 13 ядерным пробегам и 27 радиационным длинам, поэтому первичные КЛ достаточно высокой энергии вызывают разветвленную цепь взаимодействий. Возникающие при этом л±-мезоиы и частично К-мезоны при распаде порождают мюоны и нейтрино — так называемую проникающую компоненту вторичных КЛ (Мюоны при энергиях менее

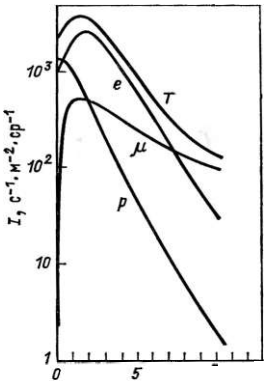


Рис. 43.11. Плотность КЛ по вертикали функция глубины атмосфере (г. Саскатун, географическая широта 60,5°, долгота 311,9°) в год минимума солнечной активности:

T — полная интенсивность: « — электроны; (г — мюоны; р — протоны [35]

Таблица 43.3. Значения порога обрезания, ГВ, для вертикальных направлений [32] (о — геомагнитная широта, 9 — геомагнитная долгота)

г	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
75	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0.1	0,0	0,0	0,0	0,0
60	**1,1**	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	1,8	1,1	0,4	0,2	0,2	0,6
45	**4,7**	5,4	5,8	6,2	6,6	7,0	5,6	**4,2**	2,4	1,3	1,4	**3,0**
30	11,2	12,1	13,3	14,4	14,4	13,6	11,9	**9,9**	9,4	4,6	4,2	**8,9**
15	14,5	15,5	16,6	17,5	17,0	15,9	14,9	14,1	13,0	9.8	9,3	13,2
0	14,0	14,8	16,1	17,0	16,8	16,2	15,8	15,2	14,6	13,6	13,1	13,7
— 15	11,0	11,5	12,4	13,0	13,4	13,7	14,2	14,4	14,2	13,7	13,0	12,3
—30	6,8	6,1	5,7	5,1	5,2	6,0	8,0	9,5	12,1	12,3	11,4	10,3
—45	3,7	2,7	2.1	1.4	1,1	1,6	2,8	4,3	5,9	9,3	8,6	6,5
-60	1,9	1,1	0,6	0,2	0,1	0,2	0,5	1,2	2,3	3,9	4,2	3,3
—75	0,6	0,3	0,1	0.0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,9	1,2	1,0

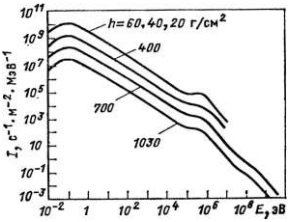


Рис. 43.12. Равновесная плотность потока нейтронов как функция энергии на различных глубинах в атмосфере на широте 44° [33]. Поток нейтронов у земной поверхности в области энергии 1—10' эВ претерпевает значительные флуктуации с изменением свойств почвы (например, при наличии или отсутствии влаги) и других трудно учитываемых локальных факторов

IQis эВ теряют энергию в основном на ионизацию вещества, их пробег примерно пропорционален энергии и достигает 1 км в грунте. Мюоны большей энергии поглощаются по экспоненциальному закону и проникают в грунт на глубину 3—5 км.) Не успевающие распасться пноны наряду с нуклонами продолжают каскад взаимодействий до энергий частиц порядка 10' эВ (так называемая ядерно-активная вторичная компонента КЛ). Распад л"— приводит к образованию электронно-фотонного ливня — электронно-фотонной вторичной компоненты КЛ (фотоны выбивают атомные электроны и порождают пары е+е-, радиационное торможение и аннигиляция которых вновь приводят к образованию фотонов) [24. 33. 34] (табл. 43.4, рис. 43.11—43.13).

Таблица 43.4. Диссипация энергии КЛ в атмосфере на геомагнитной широте 50° [33]

Канал диссипации	Мощность, 1№-«Вт/(м«ср)
Ионизация в атмосфере	120
Остаточная энергия на уровне моря	6
Ядерные расщепления	24
Нейтрино	37
Сумма	187

Ливни вторичных частиц в атмосфере Земли, порождаемые первичными КЛ с энергией более 10" эВ, называются широкими атмосферными ливнями.

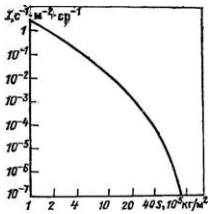


Рис. 43.13. Плотность потока мюонов на различных глубинах в зависимости от толщи S «стандартного грунта» (вещество со средней плотностью 2,65-Ю^ кг/м®, средним отношением заряда ядра к атомному номеру 2/Л=0,5 и средним значением =5,5) [36]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И. Происхождение космических лучей. М.: Изд-во АН СССР, 1963.

2. Астрофизика космических лучей/В. С. Березинскин, С. В. Буланов, В. Л. Гинзбург, В. А. Догель, В. С. Птускин; Под. ред. В. Л. Гинзбурга. М.: Наука, 1984.

3. Дорман Л. И., Мирошниченко Л. И. Солнечные космические лучи. М.: Наука, 1968.

4. Егакег J. H.//Astrophys. J. 1982. Vol. 257. P. 862—880.

5. Garcia-Munoz M., Pyle K. R., Sympson J. A.//
//Astrophys. J. 1983. Vol. 274. P. L93—98.

6. Аллеи К. У. Астрофизические величины: Пер. о англ./Под ред. Д. Я. Мартынова. М.: Мир, 1977.

7. Webber W. R., Lezniak J. A.//Astrophys. Space Sci. 1974. Vol. 30. P. 361—380.

8. Linsley J.//IAU Symp. N 94. Origin of Cosmic Rays/Ed. by G. Setti. G. Spada, A. Wolfendale. Dordrecht — Boston — Lond.: D Reidel Publ. Сотр. 1980. P. 53—68.

9. Mfiller D., Tang J.//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 2. P. 93—96.

10. Nishimura J., Fujii M., Taira T. e. a.//Astrophys. J. 1980. Vol. 238. P. 394—409.

11. Tan L. €., Ng L. K.//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 2. P. 202—205.

12. Bogomolov E. A., Lubyanaya N. D., Romanov V. A. e. a.//16th Intern. Cosmic Ray Conf. Kyoto. 1979. Vol. 1. P. 330—333.

13. Golden R. L., Horan S., Maguer B. G. e. a.//
//Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43. P. 1196—1199.

14. Bogomolov E. A., Vasileyev G. I., Krutkov S. V. e. a.//20th Intern. Cosmic. Ray Conf. Moscow. 1987. Vol. 2. P. 72-75.

15. Sympson J. A.//АПП. Rev. Nucl. Part. Sci. 1983. Vol. 33. P. 323—381.

16. Webber W. R.//Astrophys. J. 1982. Vol. 255. P. 329—340.

17. Meyer ***P.*** See [8]. P. 7—22.

18. Israel M. H.//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 12. P. 53—68.

19. Webber W. R.//Composition and Origin of Cosmic Rays/Ed. by M. M. Shapiro. Dordrecht—Boston—Lond.: D. Reidel Publ. Сотр. 1983. P. 25—45.

20. Mewaldt R. A.//Rev. Geophys. Space Phys. 1983. Vol. 21. P. 295—305.

21. Meyer J.//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 3. P. 145—148

22. Garcia-Munoz M., Mazon G. M., Sympson J. A.//
//Astrophys. J. 1977. Vol. 217. P. 859—877.

23. Linsley J.//18th Intern. Cosmic Ray Conf. Bangalore, 1983. Vol. 13. P. 135—192.

24. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975.

25. Космические лучи и солнечный ветер/Г. Ф. Крымский, А. И. Кузьмин, П. А. Кривошапкин и др. Новосибирск: Наука, 1981.

26. Топтыгин И. Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука. 1983.

27. McKibben R. B., Pyle K. R., Sympson J. A.//
y/Astrophys. J. 1982. Vol. 254. P. L23—27.

28. Evenson P., Garcia-Munoz M., Meyer P.//Astrophys. J. 1983. Vol. 275. P. L15—L18.

29. Vernov S. I., Charakchyan A. N., Stozhkov Yu. I.//
//14 th Intern Cosmic Ray Conf. Munich. 1975. Vol. 3. P. 1015—1019.

30. Мирошниченко Л. И., Петров В. М. Динамика радиационных условий в космосе- М.: Энергоатомиздат, 1985.

31. Дорман Л. И., Смирнов В. С., Тясто М. И. Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971.

32. Shee M. A., Smart D. F.//J. Geophys. Res. 1967. Vol. 72. P. 2021—2027.

33. Хаякава С. Физика космических лучей: Пер. с аигл./Под ред. И. П. Иваненко. М.- Мир. 1973. Ч. 4. 1: Ядерно-физический аспект.

34 Hillas A. M. Cosmic Ray. Oxford: Pergamon Press. 1972.

35. Komori H.//J. Phys. Soc. Jap. 1962. Vol. 17. P. 457—460.

36. Мурзин В. С. Физика космических лучей: М.: Изд-во МГУ, 1970.

ГЛАВА 44

ФИЗИКА ЗЕМЛИ

Я. А. Маслов

44.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛИ

Фигура Земли

Под действительной фигурой Земли понимают фигуру ее физической поверхности, т. е. поверхности суши, океанов, морей, озер. В научных исследованиях и при решении практических задач для описания фигуры Земли используется поверхность геоида, т. е. поверхность уровня потенциала силы тяжести.

Наконец, для научного и практического использования принимается обобщенная, достаточно простая математическая аппроксимация — эллипсоид вращения, параметры которого подбирают из условия наилучшего соответствия фигуре геоида (более строго — квазигеоида).

В ряде случаев наряду с чисто геометрическим понятием земного эллипсоида используют понятие Нормальной Земли, масса которой равна массе реальной Земли, а поверхностью является эллипсоид вращения. В 1967 г на съезде Международной ассоциации геодезии была принята модель Нормальной Земли [1]. Б 1975 г. XVI Генеральной ассамблеей международной ассоциации геодезии были уточнены физические параметры «Нормальной Земли 1967 г.» [2]:

Геоцентрическая гравитационная постоянная ОМ, m^-c-^	3 986 005-108
Геоцентрическая гравитационная постоянная атмосферы м^.с-г	35-10'
Зональные гармонические коэффициенты разложения потенциала сила тяжести:	
/,	.108 263-10-8
и	.254-10-8
1.	.**161-10**-8
/Г	23-10-8
4	.54-10-»
Экваториальный радиус Земли а^, м	6 378 140
Ускорение свободного падения на экваторе g, м-с'^	.978 032-10-5,
Обратное сжатие /-1	298 257-10-3
Потенциал силы тяжести на геоиде 1Г М2.С-2	.6263 683-10
Геопотенциальный масштабный коэффициент =ОЛ1/Го, м	.6 363 676

В СССР в 1946 г. в качестве фигуры Земли принят эллипсоид Красовского с параметр**ами** [3]:

Экваториальный радиус ***а, ш***	6 378 245
Полярный радиус 6, м	6 356 863
Обратное сжатие /-i	298,3
Площадь поверхности эллипсоида km2	5,10-108
Объем эллипсоида, км»	1,083-Юи
Средний радиус равновеликой сферы R	6 371 110
Средняя плотность Земли р, г/см^	5,517
Ліасса Земли, имеющей среднюю плотность ***М, m***	5,975-102'

Зависимость между приращениями геодезической широты ***dB*** и долготы ***dLcosB*** и приращениями длин дуг меридиана ***dx*** и параллели ***dy*** для эллипсоида Красовского имеет вид [3]

dL cos B, dB	1"	1'	
dx, dy	30,9 м	1,85 км	111км '
dx, dy	.100 м	1 км	100 км
dL cos B, dB	3,23"	32"	54'

Строение Земли

Форма Земли, близкая к эллипсоиду вращении, указывает на то, что вещество Земли находится в гидростатическом равновесии по отношению к действующим на него силам (притяжения и центробежным), т. е. Земля ведет себя по отношению к длительно действующим силам как жидкое тело [4, 5]. По оценкам вязкость Земли равна 10=^ Па-с.

В то же время модуль сдвига, определенный для Земли в целом по кратковременным воздействиям (землетрясения, приливы и перемещения масс в атмосфере и др.) составляет около 15-10"' Н-м-^. Таким образом, земной шар является вязкоупругим телом с периодом релаксации т^Ю'" с.

Упругие свойства внутри Земли изменяются на некоторых определенных значениях глубин скачком и плавно в пределах слоев, разделенных этими границами. Важнейшими границами являются поверхность Мохоровичча, залегающая на глубине 10—70 км, и поверхность Вихерта — Гутенберга на глубине 2900 км, резко преломляющая продольные упругие волны и не пропускающая поперечных волн. Эти границы разделяют земной шар на три главные зоны: кору, мантию и ядро. Кора обладает наибольшей жесткостью, мантия характеризуется высокой вязкостью, а ядро находится в состоянии, близком к жидкому, и реагирует лишь на продольные волны изменением объема. Внутри трех главных зои земного шара имеются менее четко выраженные границы. Масса литосферы составляет основную часть массы оболочек Земли [5]:

океан	кора	мантия	ядро
0,854-Ю-ч	0,23-10-3	0.435-Ю-'-'	0,6697	0.3259

Внутреннее строение Земли оценивается по известной массе, моменту инерции земного шара и на основе изучения упругих волн от землетрясений. Получено, что плотность вещества в центре Земли **рц>12,2** г/см' и ядро Земли отделено на глубине **2900** км от лежащих выше слоев резким скачком плотности, порядка **4** г/см®. Скачкообразные изменения плотности с глубиной могут быть вызваны изменением как состава пород, так и их фазового состояния [6]. Кора континентов в **3—10** раз толще коры океана. Толщина коры континентов различна на платформах **(30—40** км) и в геосинклиналях **(40—80** км) В зонах самых высоких гор Памира и Гималаев она достигает **70—80** км. Нижняя граница коры — граница Мохоровичича ***М*** — в этих областях образует корни гор, которые глубоко (на **30—40** км) по сравнению с платформенными равнинными районами внедряются в мантию. Кора океанов — тонкая, около 4—8 км. Граница ***М*** залегает здесь на глубине **10—15** км. Разность глубин границы М на континентах и в океанах составляет **20—50** км. Средняя плотность коры на континентах **2,7—2,8** г/см^, под океанами **2,9** г/см®. Плотность верхней мантии **3,3—3,4** г/см». На континентах поверхность мантии образует впадины, в океанах — огромные выступы. Земная кора континентов и океанов различается по значениям скорости распространения упругих волн. Кора океанов не содержит слоев со скоростью распространения продольных волн 6 км/с, характерных для коры континентов.

В земной коре различают два главных слоя: осадочный, состоящий из пород, залегающих почти гор№

зоитально, и консолядированный, или кристаллический. Скорости распространения упругих волн в осадочных породах имеют широкие пределы, но в толстых слоях обычно не превышают 5 км/с. В консолидированной части коры скорость распространения упругих волн выше 6 км/с (на континентах в верхней части консолидированной коры близка к 6 км/с, в нижней — к 7 км/с; в океанах 6,5 7 км|с").

Внутреннее строение Земли описывается моделями, характеризующими изменения с возрастанием глубины плотиости, кавдеии^я, •vjcAsa^jeKBst •wb'ss.vwjv, скорости сейсмических волн и других параметров. Классические модели сферически-симметричны.

Принято учитывать различия глубинного строения Земли путем построения моделей Земли океанического и континентального типов и средней модели Земли, являющейся их комбинавдеи ^табл.

Таблица 44.1. Физические параметры моделей Земли [7]

Радиус,	Глубина, км	Плотность, г/см-=	Скорость продольных волн, КМ€-»	Скорость поперечных	Модуль сжатия, 10» Па	Модуль сдвига, 10» Па	Давление, 10» Па	Ускорение свободного падения, см/с^
0	6371,0	13,012	11,241	3,565	14 237	1653	3632,4	0
1217,1	5153,9	12,704	11,091	3,439	13 625	1502	3288,7	436.2
1217,1	5153,9	12,139	10,258	0,000	12 773	0	3288,7	436,2
3485,7	2885,3	9,909	8,002	0,000	6 345	0	1354,0	1069.3
3485,7	2885,3	5,550	13,732	7,243	6 582	2911	***1354,0***	***1069,3***
5701,0	670,0	5,377	10,928	6,114	3 045	1639	239,1	1001,2
5701,0	670,0	4,077	10.038	5,417	2 480	1220	239,1	1001,2
5951,0	420,0	3,768	9,554	5,052	2157	961	141,1	997,6
Океаническая Земля								
5951,0	***лоп*** п	3,553	8,949	4.789	1758	815	141,1	997,6
6360,0	11,0	3,305	7,900	4,550	1 150	684	2.2	983,5
6360,0	11,0	2,850	6,400	3,700	647	390	2,2	983.5
6366,0	5,0	2,850	6,400	3,700	647	390	0,6	983.0
6366,0	5,0	1,500	2,000	1,000	40	15	0,6	983,0
6367,0	4,0	1,500	2,000	1,000	40	15	0,4	982,9
6367,0	4,0	1,030	1,500	0,000	23	0	0,4	982,9
6371,0	0.0	1.030	1,500	0,000	23	0	0	982,0
Континентальная Земля								
5951,0	420,0	3,553	9,135	4,816	1865	823	140,7	997,6
6336,0	35,0	3,320	8,020	4,690	1161	730	9,7	984,2
6336,0	35,0	2,920	6,500	3,750	686	410	9.7	984,2
6351,0	20,0	2,320	6,500	3,750	686	410	5.3	983,3
6351,0	20,0	2,720	5,800	3,450	483	323	5,3	983,3
6371,0	0,0	2,720	5,800	3,450	483	323	0,0	981,6
Средняя Земля								
5951,0	420,0	3,553	8,967	4,806	1762	820	141,1	997,6
6352,0	19,0	3,310	7,934	4,654	1127	716	4.8	983,7
6352,0	19,0	2,902	6,500	3,750	681	408	4,8	983,7
6357,0	14,0	2,902	6,500	3,750	681	408	3,3	983,4
6357,0	14,0	2,802	6,000	3,550	537	353	3,3	983,4
6368,0	3,0	2,802	6,000	3,550	537	353	0.3	982,6
6368,0	3,0	1,030	1,500	0,000	23	0	0.3	982,6
6371,0	0,0	1,030	1,500	0,000	23	0	0.0	981,9

44.2. ЛИТОСФЕРА

Состав ff свойства (табл. 44.2—44.4)

Литосфера состоит из осадочных и кристаллических пород. В пределах литосферы различают два резко различных региона [8]: глубинную океаническую область (площадь 268 млн. км^, средняя глубина ниже уровня моря 4,5 км, мощность слоя 6 км) и область континентального щита (105 млн. км', средняя высота над уровнем моря 0,75 км, мощность слоя 35,05 км). Различают две переходные области: область молодых складчатых поясов (42 млн. км') и субокеаническую область (93 млн. км'). Площадь 2 млн. км' суши в основном представляет собой вулканические острова.

Поле силы тяжести

Поле силы тяжести на поверхности Земли определяется потенциалом и его\ первыми и вторыми производными [12]. Приведем эти величины в прямоугольной системе координат с направлениями осей: ***x*** — на север, !/ — на восток, ***z*** — вниз по направлению отвесной линии. Потенциал W является суммой потенциалов притяжения земных масс (гравитационного потенциала) и центробежных сил, возникающих при вращении Земли (центробежного потенциала), и выражается в джоулях.

Для его первой производной (ускорения свободного падения) ***gz=dW/dz*** (табл. 44.5) и вторых производных (Wxx, Vïyx, .,.) введены специальные наимено-

Таблица 44.2. Средний химический состав литосферы [6]

Соединение	Масса, да» кг	Содержание,-%	Соединение	Масса, 10^ кг	Содержание, %
	13 050	55.2		661	2,8
Al2O3	3 629	15.3		452	1,9
	2 082	8,8	**ТЮ,**	385	1,6
FeO	1381	5,8	P205	62,0	0,3
MgO	1234	5,2	MnO	42,6	0.2
Na^O	682	^.9			

.3. Основные физические свойства горных печ)од [9]

	магматических и метаморфических	
Плотность, г/см®	2,5-3,3	1,9-2,9
Пористость, %	До 10	До 40
Магнитная восприимчивость, 10-е м^/кг	100-4000	До 600
Остаточное намагничивание, 10-3 А/м	До 320	
Модуль Юнга, 10" г/см^	5-30	2,5-12
Коэффициент Пуассона	**0,21-0,28**	0,23—0,27
Скорость распространения продольных колебаний, км/с	4,9-10,1	0,5-5,9
Удельное электрическое сопротивление, Ом-м	400—100 000	0,3—5000
Теплопроводность, Вт/(см.К)	0,001—0,03	0,01-0,03
Удельная теплоемкость, Дж/(г-К)	0,5—1,17	0,67-0,96

Распространенность химических земной коре [10, 11]

Атомный номер	Элемент	Массовое садержаине, %
I	Водород	1,00
2	Гелий	1о-«
3	Литий	5- Ю-з
4	Бериллий	4-10-4
5	Бор	5-10-3
6	Углерод	0,35
7	Азот	0,04
8	Кислород	49,13
9	Фтор	0,08
10	Неон	5-10-'
И	Натрий	2,40
12	Магний	2,35
13	Алюминий	7,45
14	Кремний	26,00
15	Фосфор	0,12
16	Сера	0,10
17	Хлор	0,20

Продол **о ю***ение табл. 42 /***3**

Атомный номер	Элемент	Массовое содержание. %
18	Аргон	4-10-^
19	Калий	2,35
20	Кальций	3,25
21	Скандий	6-ю-*
22	Титан	0,61
23	Ванадий	0,02
24	Хром	0,03
25	Марганец	0,10
26	Железо	4,20
27	Кобальт	2-10-3
28	Никель	0,02
29	Медь	0,01
30	Цинк	0,02
31	Галлий	10-^
32	Германий	4-10-*
33	Мышьяк	5-10-*
34	Селен	8-10-6-
35	Бром	
36	Криптон	2.10-3
37	Рубидий	8-10-3
38	Стронций	0,035
39	Иттрий	5-10-3
40	Цирконий	0,025
41	Ниобий	3,2.10-S
42	Молибден	10=»
44	Рутений	5-10-е
45	Родий	10-е
46	Палладий	5-10-е
47	Серебро	5-10-е
48	Кадмий	5-10^
49	Индий	10-5
50	Олово	8-10-3
51	Сурьма	5-10-5
52	Теллур	10-е
53	Иод	10-4
54	Ксенон	3-10-9
55	Цезий	10-3
56	Барий	0,05
57	Лантан	6,5-10-*
58	Церий	2,9.'0-3
59	Празеодим	4,Б.10-«
60	Неодим	1,7-10-s
62	Самарий	7.10-<'
63	Европий	2-10-5
64	Гадолиний	7,5-10-«
65	Тербий	10-*
66	Диспрозий	7,5-10-*
67	Гольмий	Ю-*
68	Эрбий	6,5-10-*
69	Тулий	10-^
70	Иттербий	8-10-^
71	Лютеций	1,7-10-4
72	Гафний	4-10-*
73	Тантал	2,4-10-§
74	Вольфрам	7-10-3
75	Рений	10-'
76	Осмий	5-10-е
77	**Иридий**	10-6
78	**Платина**	2-10-®.
79	Золото	5-10-'
80	Ртуть	5-10-е
81	Таллий	10-5
82 ,	Свиней	1,6-10-3
83 -	Висмут	10-S
90	Торий	10-3
92	Уран	4-10-*

вания единиц: для ***g*** — 1 гал=1 см/с^ и для вторых производных — этвеш, обозначается буквой Е: 1 этвеш = **Е=10-Эс=.**

Таблица 44.5 Зависимость ускорения свободного падения ***g,*** см-с-^, от широты места град, на поверхности эллипсоида Красовского [12]

9	*ё*	*9*	g	*V*	g
0	978,0300	30	979,3212	60	981,9140
5 i	978,0692	35	979,7299	65	982,2853
10	978,1856	40	980,1659	70	982,6061
15	978,3757	45	980,6159	75	982,8664
20	978,6338	50	981,0663	80	983,0584
25	978,9521	55	981,5034	85	983,1759
				90	983,2155

Значения вторых производных потенциала силы тяжести на поверхности эллипсоида Красовского выражаются формулами, 10^® с':

$$v^{yy} - W^{x} = 1Гд - 5,1\ \{1 + \cos 2<f);\qquad = 0;$$

$$Wy^{} = 0;\qquad = 8,1 \sin 2\text{-}r,\qquad =$$

$$= — 3086\ (1 + 0,00071 \cos 2<P>).$$

Периодические изменения *g* [12] на поверхности Земли, обусловленные влиянием Луны, составляют до 2,49-10-* см/с^. Амплитуда солнечного приливного действия составляет 9,6-10-5 *см/с*\ так что суммарное влияние Луны и Солнца на *g* достигает 3,45-10-^ см/с'. Амплитуда приливных изменений ***g*** зависит от широты места наблюдения.

Сейсмичность [13]

Землетрясения — колебания Земли, вызываемые прохождением сейсмических волн из какого-либо источника сейсмической энергии. Интенсивность (сила землетрясения определяется по степени разрушения зданий, характеру изменения земной поверхности и по данным об испытанных людьми ощущениях (табл. 44.6, 44.7) Магнитуда землетрясения (табл. 44.8) — показатель энергии очага, выражается в виде десятичного логарифма амплитуды наибольшего колебания грунта, записанного при прохождении сейсмической волны того или иного типа с внесением поправок, выражающих средние эмпирические зависимости интенсивности для коровых землетрясений от эпицентрального расстояния, а для подкоровых — еще и от глубины очага. Наиболее употребительны три шкалы магнитуд: рихтеровская (или локальная) Мс, определяемая по объемным продольным волнам ***m*** или ***mb',*** определяемая по поверхностным волнам ***Ms.*** Между шкалами существуют некоторые различия, зависящие от энергии землетрясения. Зависимость между энергией упругих волн, Дж, и магнитудой может быть задана уравнением типа

$$\log £o = 5,24 + 1,44\ Л!^{}\ .$$

Для определения магнитуды достаточно знания эмпирических зависимостей, характеризующих строение и свойства Земли на пути распространения волн, а для установления сейсмической энергии в очаге необходимо их детальное знание. Поэтому магнитуда как показатель интенсивности землетрясения в очаге в последние десятилетия стала преобладающей характеристикой.

Упругие волны в Земле [15]. Распространение упругих деформаций при землетрясениях носит волновой характер. Обычно исследуются продольные ***(P)*** ***и*** поперечные ***(S)*** объемные волны, а также поверхностные — волны Рэлея у которых колебание частиц происходит в плоскости, перпендикулярной поверхности и проходящей через направление сейсмического луча, и поперечные поверхностные волны Лява (L).

Скорость сейсмических волн возрастает с увеличением глубины (табл. 44.1).

Микросейсмические колебания [16, 17]. Планетарные микроскопические колебания поверхности Земли — микросейсмы первого рода — регистрируются в диапазоне частот от 0,03 до 100 Гц в зависимости от места.

Таблица 44.6. Шкала землетрясений [14, 15]

Балл	Наименование	Смещение,	Ускорение, мм/с	
1	Незаметное	-	2,5	Колебания почвы отмечаются приборами (микросейсмы)
2	Очень слабое	—	2,5-5,0	Изредка ощущаются людьми
3	Слабое		5-10	Отмечаются немногими людьми
4	Умеренное	0,5	10-15	Отмечаются многими людьми. Возможно колебание окон, дверей
Б	Довольно сильное	0,5-1-1	25-230	Качания висящих предметов, скрип полов, осыпание побелки
6	Сильное	1,1-2	50-100	Легкие повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке, трещины в печах и т. д.
7	Очень сильное	2,1—4	100-250	Значительные повреждения в зданиях; откалывание отдельных кусков штукатурки, тонкие трещины в стенах
8	Разрушительное	4,1-8	250-500	Разрушения в зданиях: большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб
9	Опустошительное	8,1—16	500-1000	В некоторых зданиях обвалы: падение стен, перекрытий, кровли
10	Уничтожающее	16,1—32	1000—2500	Обвалы во многих зданиях, трещины в грунте около метра шириной
11	Катастрофическое	32	2500—5000	МногочисленАые трещины на поверхности Земли, большие обвалы в горах
12	Сильная катастрофа	-	>5000	Изменение рельефа в больших размерах

Таблица 44.7. Статистика землетрясений за 1918-1964 гг. 115]

Магнитуда	Число толчков за 10 лет	Энергия за 10 лет. Дж
8,5-8,9	3	156-1016
8,0-8,4	11	113-10'6
7,5-7,9	31	80-1016
7,0-7,4	149	58.10W
6,5-6,9	560	41-10'®
6,4-6,8	2100	30-10"

Таблица 44.8. Энергия и магнитуда некоторых источников землетрясений [15]

0	1,7.105	Для очень слабых толчков данные ненадежны
1	4,8-106	
2	1.3-108	
2,5		Самые слабые из ощутимых землетрясений
3	3.6-Ю"	
4	1,0-10"	
5	2.7-10'2	Самые слабые, вызывающие повреждения зданий
6,0	4,4-1013	Землетрясение в Скопле, 1963 г.
7,0	2,Ы0'§	Землетрясение в Инангахуа, 1968 г.
7,8	–	Буш^овское землетрясение.
7.9	–	Землетрясение в Хокс-Бей, 1931 г.
8,3	-	Землетрясение в Сан-Франциско, 1906 г.
8.4	Z	Чили, 1960 г., Аляска, 1964 г.
8,9		Самые сильные зарегистрированные сейсмические толчки: Колумбия, 1906 г., Саприкю, 1933 г.

условий наблюдения и частоты; они достигают 10 мкм для низкочастотных колебаний и уменьшаются до 10"' мкм в очень тихих районах для частоты ~ 1 Гц.

Микросейсмы второго рода вызваны поверхностными источниками (транспорт, промышленные предприятия, прибой и др.); они имеют периоды от 0,001 до 0,1 с, зависят от грунтовых условий и быстро убывают с удалением от источника. Амплитуды смещений лежат в диапазоне —10-^—5-10-^ мкм.

Магнитное поле

Магнитное поле Земли характеризуется вектором напряженности ***Т.*** Проекции вектора ***Т*** на оси прямоугольной системы координат образуют составляющие геомагнитного поля: ***Z*** — вертикальную, —северную, У — восточную. Часто применяется также горизонтальная составляющая У -f Y^.

Угол между горизонтальным направлением Н и географическим меридианом называется склонением D, а угол, образуемый вектором напряженности с горизонтальной плоскостью, — наклонением /.

Постоянное магнитное поле [18, 19]. Географическое распределение постоянного магнитного поля соответствует полю однородно намагниченной сферы с координатами полюсов: Северного (в Южном полушарии) <р=71,2°. Л= 150,8° и южного (в Северном полушарии) (р=70,5°, Я=264°. Линия, соединяющая магнитные полюсы, наклонена относительно географической оси на 11,5° и смещена от центра Земли на 1140 км в сторону Тихого океана. Напряженность магнитного поля на магнитном полюсе 19,5 А/м (0,65 Э), напряженность магнитного поля на магнитном экваторе 10,5 А/м (0,35 Э).

Параметры постоянного магнитного поля Земли изменяются на ее поверхности в следующих пределах:

Z	D	I
От-i-18,6 до 21,8 А/м (от -f0,62 до —0,73Э)	От О до ±12,3 А/м (от О до -f0,41 Э)	
От+18,6 до—21,8 А/м (от +0,62 до-0,73 Э)	0т-180°до-f180°	От—90°до-1-90'>

Общими чертами магнитного поля материков и океанов являются [19]:

крупноблоковая структура аномального магнитного поля с размерами участков различного характера поля от нескольких сотен километров и более;

наличие минимума в спектре аномального поля от 400 до 4000 км;

наличие областей с отчетливой анизотропией поля. Значения аномалий магнитного поля континентов вблизи поверхности колеблются в пределах от нескольких десятых долей ампера на метр до нескольких амперов на метр и более вблизи выходов фундаментов платформ на поверхность.

Географическое распределение постоянного магнитного поля Земли с учетом магнитных аномалий площадью от нескольких километров До целых материков изображается в виде карт, относящихся к определенной эпохе. Карты составляющих напряженности магнитного поля приведены на рис. 44.1—44.5 [19].

Вековые вариации геомагнитного поля. Средние значения элементов геомагнитного поля изменяются со временем Сравнение элементов поля для 1885 и 1950 гг. приводит к выводу, что полный магнитный момент Земли уменьшается в течение года приблизительно на 7-10-^ Следовательно, короткий, в геологическом отношении отрезок времени достаточен, чтобы полностью изменить всю картину геомагнитного поля.

Переменное магнитное поле Земли. Периодические вариации [20]. Все периодические вариации магнитного поля Земли имеют источник вне Земли. Вариации классифицируют по длине периода, что является одновременно классификацией по физическим причинам. Выделяются солнечно-суточные вариации, вызванные суточным движением Земли вокруг Солнца, лунно-суточные, годовые, циклические с периодом 11 лет, связанные с изменением солнечной активности, и др. Амплитуды всех периодических вариаций, кроме солнечно-суточных, составляют единицы угловых минут склонения и тысячные доли А/м напряженности поля (табл. 44.9).

Непериодические вариации магнитного поля Земли. Магнитные бури. Магнитные бури и общая магнитная активность вызываются взаимодействием корпускулярного излучения Солнца с постоянным магнитным полем Земли. Магнитные бури — резкие, неправильной формы колебания магнитного поля Земли — начинаются одновременно на всем магнитном земном шаре и имеют тенденцию к повторению через 27 суток. Поле изменяется по значению и направлению на несколько процентов за время от нескольких часов до нескольких суток.

Земные теллурические токи [21, 22]. Токи и переменное магнитное поле — явления, связанные между

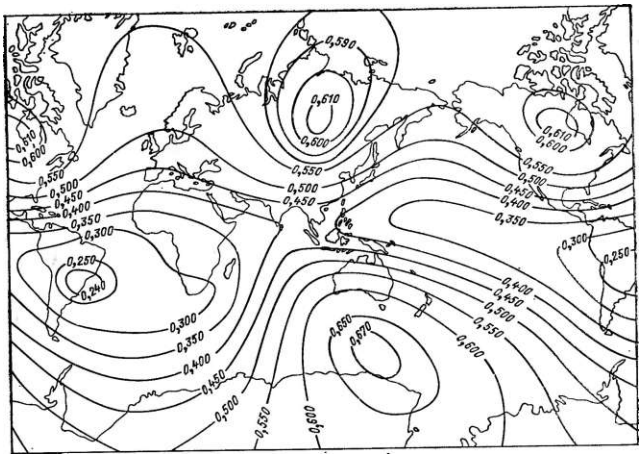


Рис. 44.1 Карта напряженности нормального геомагнитного поля Г„, 10 * Тл, эпоха 1980 г. [19]

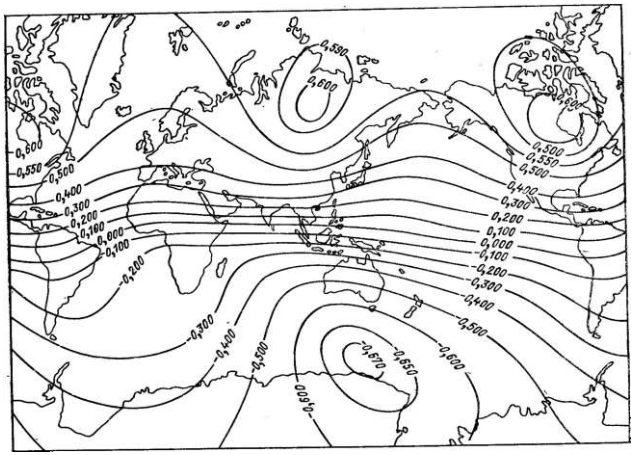


Рис. 44.2. Карта вертикальной составляющей Zh нормального геомагнитного поля, 10 ^ Тл, эпоха 1980 г. [19]

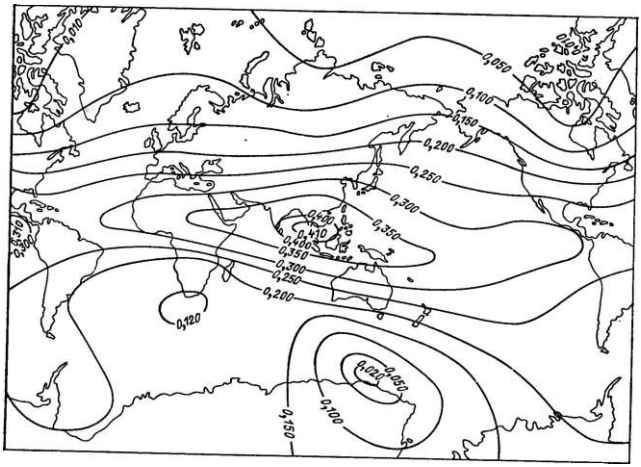


Рис. 44.3. Карта горизонтальной составляющей H_n нормального геомагнитного поля. 10- Тл. эпоха 1980 г. [19]

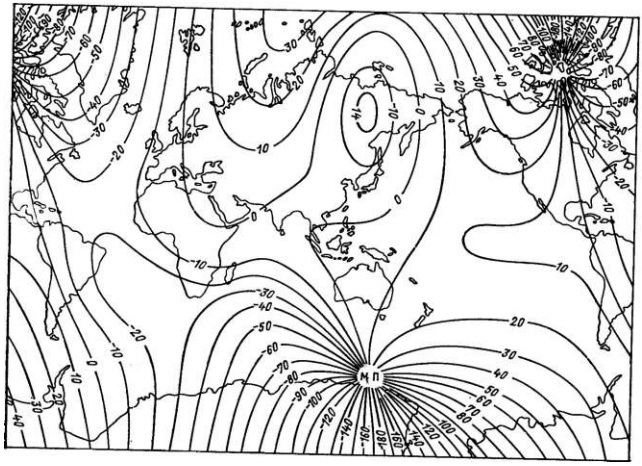


Рис. 44.4. Карта значений магнитного склонения, град, эпоха **1980** г. [19]

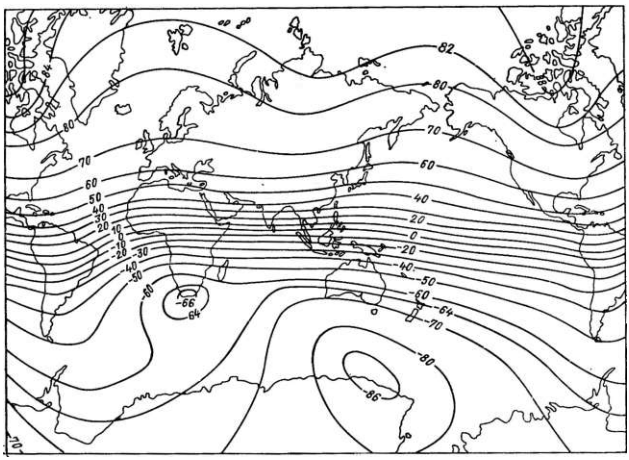


Рис. 44.5. Карта нормальных значений магнитного наклонения, град, эпоха 1980 г. [19]

Таблица 44.9. Солнечно-суточные вариации геомагнитного поля, 0,3-Ю"» А/м [20]

Составляющая напряженности	Годы низкой магнитной активности				Годы высокой Мапнитной активности			
	Средние широты		Высокие широты		Средние широты		Высокие широты	
	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	ные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни
Горизонтальная H	7-40	18-58	44-80	90-402	8-74	25-109	27-77	50-460
Вертикальная Z	4-16	9-36	20-90	103-305	6—26	14—128	15—70	128-315
Модуль полного вектора	6-26	11-64	20-65	150-300	8-35	13—104	35-110	230-275

собой. Плотность теллурических токов ***j*** для различных участков земной поверхности приблизительно одинакова: /=2 А/км^. Интенсивность теллурических токов возрастает от низких широт к высоким. На низких широтах напряженность поля обычно не превосходит нескольких десятков милливольт на километр. В полярных странах напряженность может достигать единиц и даже десятков вольт на километр; наиболее сильны теллурические токи во время магнитных бурь.

Тепловое поле

Температура внутри Земли [23]. У поверхности Земли температура почвы и неглубоко залегших горных пород определяется балансом тепла, получаемого от Солнца и излучаемого в атмосферу. Роль терморегулятора играют водная и воздушная оболочки Земли. В среднем глубина проникновения суточных колебаний температуры почвы в зависимости от ее свойства и географических условий изменяется от 35 до 100 см. Запаздывание наступления экстремумов в среднем составляет 2—3 ч на каждые 10 см глубины.

Глубина проникновения годовых колебаний температуры составляет в низких широтах около 5—10 м, а в средних и высоких 8—24 м, доходя до 30 м. Глубина проникновения вековых изменений больше 50 м и сохраняется надолго вследствие запаздывания температурной волны по фазе с глубиной. Вечная мерзлота, распространяющаяся местами до нескольких сотен метров, является реликтом ледникового периода, минувшего несколько десятков тысяч лет назад. Наблюдения в шахтах и буровых скважинах показывают постепенное увеличение температуры с глубиной. На глубине около 2800 м в Калифорнии температура достигает 400 К, в разведочных скважинах на Северном Кавказе зарегистрирована температура около 430 К на глубине 3200 м. Скорость изменения температуры с глубиной характеризуется геотермическим градиентом или обратной ему величиной геотермической ступени. Значения ***dT/dh*** изменяются от 0,1 До 0,01 К/м. На дне океана

средние значения ***dTIdh*** порядка 0,08 К/м (для Тихого океана) и 0,04 К/м (для Северной Атлантики).

Средний поток тепла из недр Земли составляет около 5,0-10-^ Дж/(см2-с). Диапазон изменений теплового потока на континентах — от 1,67-10-® до 12,56-10-® Дж/(см2-с); в океанах — от ±0,42-10-в до 37,68-10-® Дж/(см2-с). Постоянным источником внутреннего тепла Земли являются радиоактивные элементы (табл. 44.10)

Таблица 44.10. Среднее содч)жание радиоактивных элементов в главных типах осадочных пород, 10'® г/г, и количество выделяемой энергии [24]

Порода		2згхЬ	-«К	А 10-» Дж/(сы2.с)
Пески и алевролиты	2,3	5,9	16-103	11,30
Глины и глинистые сланцы	2,9	10,9	20-103	16,7
Карбонаты	2,1	2,2	7-103	5,44
Среднее	-	-	-	12,56

Охлаждение глубинных слоев Земли в настоящее время идет медленно. Активной в термическом отношении зоной являются верхние слои Земли до глубины 100—200 км, особенно в областях распространения кислых изверженных и магматических пород.

Тепловой баланс Земли [25]. Земля ежегодно поглощает 703 кДж/см^, из них: 469 кДж/см2 — земная поверхность; 234 кДж/см^ — атмосфера Земли. Потери земной поверхностью на длинноволновое эффективное излучение составляют 167 кДж/см^, потери на испарение — 247 кДж/см^ передача в атмосферу через турбулентную теплоотдачу — 54 кДж/см^.

44.3. ГИДРОСФЕРА

Мировой **океан** [26]

Площадь мирового океана составляет ЗбиЗ-Ю'км® (70,8в/о поверхности Земли), объем вод 1338,5-10® км', средняя глубина 3705 м (табл. 44.11).

Таблица 44.11. Главные морфометрически характеристики океанов

Океан	II 1=	i i i i o °	S S 8s	i i	s ё» ч1
Тихий	178,68	49,4	707,1	52,8	3957
Атлантический	91,66	25,4	330,1	24,7	3601
Индийский	76,17	21,1	284,7	21,3	3736
Северный Ледовитый	14,79	4,1	16,7	1,2	1129

Океаническое дно имеет три четко выраженные ступени: материковую отмель, материковый склон и ложе океана или моря. Материковая отмель (шельф, континентальное плато) является продолжением поверхности материков; занимает около 7,5% площади Мирового океана. Средняя ширина материковой отмели равна 78 км, однако у берегов Африки она практически отсутствует, а у северных берегов Азии имеет ширину несколько сот километров.

Со стороны океана материковая отмель ограничена бровкой, глубина которой — от 20 до 500 м (средняя глубина 133 м).

Материковый склон круто опускается от бровки материковой отмели к ложу океана или моря и занимает около 15.5% площади Мирового океана. Нижняя граница его проходит на глубине 2000—4000 м, ширина изменяется от нескольких километров до нескольких сотен километров. Средний угол наклона составляет около 3,5°, максимальный достигает 40—45°.

Ложе океана или моря — это центральная, преимущественно равнинная часть дна, расположенная на глубине свыше 2000—4000 м и составляющая около 77% площади Мирового океана. При взаимодействии поверхности океана с атмосферой возникает ветровое волнение (табл. 44.12).

Таблица 44.12. Шкала силы (степени) ветрового волнения и глубины распространения волн [26]

Волнение, баллы	Характеристика	Размеры волн			Глубина распространения, м
		Высота, м	Длина,	Период.	
0	Отсутствует	0	0	0	0
I	Слабое	До 0,25	До 5,0	До 2.0	До 2,6
II	Умеренное	0,25-0,75	5-15	2-3	2,6-10,3
III	Значительное	0,75-1,25	15-25	3-4	10,3-19,2
IV	Значительное	1,25-2,0	25-40	4-5	19,2-33,7
V	Сильное	2,0-3,5	40-75	5-7	33,7-69,9
VI	Сильное	3,5-6,0	75-125	7-9	69,9-127,3
VII	Очень сильное	6,0-8,5	125-170	9-11	127,3-182,6
Vlil	Очень сильное	8,5-11,0	170-220	11-12	182,6-245,3
IX	Исключительное	>11,0	>220	>12	>245.3

Таблица 44.13. Распределение запасов на поверхности Земли [32]

Запас воды	Объем, км'	Масса, кг
Океаны и моря	1336-108	1,3-10^1
Полярный лед	3.510в	3,5-1018
Озера	2,5-10=	2,5-10"
Подземные озера	2,5-105	2,5-1017
Реки	5-10^	5-1018
Болота	6; 103	6-101=
Снежный покров	250	2,5-101*
Полный запас	1340-10®	(1,8-^-2.7) - 1018

Влагооборот (табл. 44.13). Общее количество воды, выпадающей за один год в виде осадков, для всего земного шара оценивается в 5-10" кг, что в 40 раз больше общего содержания воды в атмосфере. По современным Данным (с погрешностью до 10%) общее количество осадков, выпадающих на поверхность Мирового океана, дает в среднем слой осадков 102 см/год.

что соответствует выпадению 370 000 км^ воды. Испарение с поверхности океана составляет 113 см/год, или 407 ООО км^ воды, и речной сток в океаны оказывается равным 10,3 см/год, или 37 000 км*.'

Для поверхности суши с учетом стока в океан получены следующие значения, см/Род: осадки 70,0 (102 000 км»),, испарение 44,6 (64 900 км^) и сток 25,4 (37 000 км^). На долю частей суши, не имеющих стока в океан, приходится всего около 8000 км® осадков и столько же на испарение. В целом для земного шара Годовой слой осадков, равный годовому испарению, составляет 92,8 см/год (472 000 км®), причем на сушу из общего количества осадков выпадает только 227о. а на океан 78%; испарение же с поверхности суши составляет 14% общего испарения, а остальные 86% испаряются с поверхности океана.

Таблица 44.14. Средний химический состав океанической воды при Г = 5% и хлоркости 19%

апемент	Содер^жание, j1	Элемент	Содержание, %
Кислород	85,94	Медь	6-10-'
Водород	10,80	Свинец	4-10-7
Хлор	1,898	Марганец	4-10-7
Натрий	1,056	Селен	4-10-7
Магний	1,272-10-1	Цезий	2-10-'
Сера	8,84.10-2	Уран	1,5-10-'
Кальций	4,00-10-2	Молибден	5-10-8
Калий	3,80-10-«	Галлий	5-10-«
Бром	6,5-10-3	Торий	<5-10-8
Углерод	3,0-10-3	Никель	3-10-8
Азот	1,7-10-3	Ванадий	3-10-8
Стронций	1,33-10-3	Церий	3-10-8
Бор	4,6-10-4	Иттрий	3-10-8
Кремний	>2 - 10-*	Лантан	3-10-8
Фтор	1,3-10-«	Криптон	2.8-10-8
Аргон	6,Ы0-ь	Висмут	2-10-8
Рубидий	2 10-ь	Неон	1,1-10-8
Литий	МО-®	Кобальт	10-8
Фосфор	1-10-6	Серебро	10-8
Иод	5-10-6	Ксенон	9,4-10-«
Барий	5-10-е	Скандий	4-Ю-»
Мышьяк	1,5-10-е	Ртуть	3-10-9
Цинк	ы о - 6	Гелий	5,2-IO-f
Алюминий	ы о - в	Золото	5 10-'в
Железо	м о - в	Радий	(0,2-^3)-10-«о

Таблица 44.15. Важнейшие вещества, растворенные в морской, озерной и речной Воj

Ионы	Концентрация, г/10^ кг	10- кг|	Концентрация, г/10= кг	
C1-	19 360		51,2	1178
Na+i	10 770		29,8	680
s o r^	2701	4 321 С О Г	17,7	407
Mg+r	1298		17.1	393
Са+г	408		8.3	191
	387		8.4	193
н с о - 1	128		5,0	155
Вг-1	66	?п\(А Ь' *FehOs*	4.0	92
НзВОз	27		3.1	71
Sr+2	14	SNOJ-i	1,3	

Большая часть воды (90%) содержится в нижнем слое атмосферы (до 8—10 км) и составляет 0,3—0,4% массы атмосферного воздуха в этом слое. Основная часть воды в атмосфере находится в парообразном состоянии (около 95%), на долю облачных частиц (капель воды и кристаллов льда) приходится менее *5%* массы воды, содержащейся в атмосфере.

Таблица 44.16. Растворимость газов в морской и пресной воде в зависимости от температуры, см^/л

Газ	В пресной воде при температуре, "С						в морской воде *IS* = при температуре.			
	0	1	10	j 20	j	30	0	j 10	.0	30
	18,18	14,60	12,24	10,98			14,04	11,72	10,18	9,08
	10,29	8,02	6,57	5,57			8,04	6,41	5,35	4,50
Аг	0,54	0,42	0,35	0,30			0,41	0,31	0,25	0.21
СО,	0,52|	0,361	0,26|	0,20		0,44|	0,31	0,23	0,18
Всего	29,45	j23,4	oj19,42	j17,05			22.93|	18,75	16,01	13.97

Таблица 44.17. Феноменологические коэффициенты воды при атмосферном давлении

Название	Чистая вода		Океаническая вода (S = :35«/со)	
	О'С	20°С	С С	20° С
Динамическая вязкость pv, г-см-1-с-'	1,787X XI0-2	1.002X хЮ-г	1,877X xio-2	1.075X X 10-2
Теплопроводность Вт-см-»-К	5,66X X10-3	5,99X хю-з	5,63X хЮ-з	5,96X хю-з
Кинематическая вязкость м. см^-с-1	1,787X X10-2	1,004X XШ-2	1,826x X10-2	1,049x xIO-2
Температуропроводность *n/Cpf,* СМ^-С-l	1,34X X10-®	1,43X xio-3	1,39X X10-3	1.49X XЮ-з
Коэффициент диффузии О, см^-с-» (NaCl)	0,74X X 10-5	1,41X XIO-s	0,68x X1O-s	1,29x X10-6
Число Орандтля *\/%/Cpf*	13,3	7,0	13,1	7.0

Состав и свойства вод [27] (табл. 44.14-44.17)

Вследствие большой ионизирующей способности воды растворенные в ней соли оказываются в ионно-дисперсной форме. Относительное количество растворенных веществ в 1 л морской воды называется соленостью, выражается в промиллях и обозначается S, %о. Существует связь между S, %о, и хлорностью (содержанием хлора в морской воде), %о:"

$$S = 0,03 + 1,805C1.$$

Средняя соленость морской воды 5=34.85 %о, средняя хлорность С1 = 19,377оо.

Физические свойства океанической воды и льда [28]

Плотность р и электропроводность морской воды Хтабл. 44.18, 44.19) зависят от температуры, солености и давления. Значения плотности р в Мировом океане изменяются от 1,0757 до 0,9960 г/см^, поэтому для

Таблица 44.18. Условная плотность морской воды г/см3, в зависимости от температуры и солености 5

t, °C	S.		
	за	35	38
0	25,71	28,13	
14	23.90	26,21	
28	20,17	22,41	24,67

Таблица 44.19. Удельная электропроводность X морской воды в зависимости от температуры и солености, 10* Ом/м

t,	S.- V..			
	10	20	30	40
0	923	1747	2528	3276
15	1378	2594	3740	4834
25	1712	3214	4626	5967

удобства расчетов вводится условная плотность:

$$S, PJ = \frac{5 \cdot Pd)}{1p(4, o, Pa)} - 1 \cdot 10^8,$$

где р (4, О, *Ра) = 1* г/см^ — плотность пресной воды при температуре 4 °С и атмосферном давлении *Ра-*

Зависимость О. г/см^, от солености S, °/оо, определяется формулой

o=(-0,093 +0,81495 - 0,00048252 + 0,000006853).

Характерные для поверхности моря значения плотности, зависящие от температуры, находятся в пределах от 0,9960 до 1,0283 г/см®.

Удельная теплоемкость океанической воды близка к 4,18 Дж/(г-К) и уменьшается при увеличении солености, температуры и давления. При атмосферном давлении, ^=0''С и 5=0%о она составляет 4,22 Дж/{г-К), а при *(=30 "С* и 5= 40%о равна 3,87 Дж/(г-К). Удельная теплоемкость воды при /=0°С и 5=34,85%о убывает от 3,93 Дж/(г-К) на поверхности до 3,89 Дж/(г-К) на глубине 1 км и до 3,64 Дж/(г-К) на глубине 10 км.

Теплопроводность. Решающую роль в распространении тепла в океане играет турбулентная теплопроводность при фрикционном и конвективном перемешивании вод.

Молекулярная теплопроводность воды очень невелика. например при ^=17,5°С:

S, о/оо	О	**20**	30
103*, Дж/(см • с • К)	5,81	5,65	5.57

Температура замерзания t океанической воды понижается при увеличении солености 5, %о:

•с = - 0,003° - 0,0527''5 — 0,0000004° 5®.

Температура замерзания воды, имеющей среднюю океаническую соленость (5=35%о). равна — 1,9 "С, что гораздо ниже не только средней температуры поверхностного слоя воды, но и средней температуры (3,8 °С) всей водной толщи.

Вязкость воды складывается из молекулярной и турбулентной компонент. Молекулярная вязкость дистиллированной воды зависит от температуры;

	О	**10**	**20**
гj, 103 Па	1,797	1,307	1,004

При 5=40%о значения ч на ***6—9%*** выше приведенных.

Турбулентная вязкость во много раз превосходит молекулярную и является главной причиной фрикционного перемешивания вод.

Поверхностное натяжение и океаническом воды уменьшается с ростом температуры и увеличивается с увеличением солености S и хлорности Cl. Зависимость а от *t,* "С и Cl, 7оо, имеет вид

a = (75,611—0Л44<+ 0.0399 Cl).

Физические свойства морского льда (табл. 44.20, 44.21) [29]

Морская вода не имеет определенной точки замерзания. При общей солености воды 33‰ образование льда начинается при —1,8 Но между кристаллами льда остается небольшое количество морской воды, в которой отдельные соли выкристаллизовываются при более низких температурах, и только при —5,5 °С образовавшийся рассол полностью застывает. Соленость и количество находящегося во льду воздуха определяют плотность морского льда,

Таблица 44.20. Плотность морского льда зависимости от солености и содержания воздуха

Объемное содержание воздуха, %	S, »/оо			
	0	10	20	30
0	0,918	0,925	0,934	0,942
3	0,890	0,898	0,906	0,914
6	0,863	0,871	0,879	0,887
9	0,835	0,843	0,851	0,859

Таблица 44.21. Зависимость температуры замерзания т, °С, и температуры наибольшей плотности 6, "С, от солености *S,* "/„о. океанической воды [30]

S, о/о„	О	5	10	15	20
т. °С	О	—0,3	—0,5	- 0 ,8	—1.1
е,	3.98	2.9	1.9	0.8	0. 3

Продолжение табл. 44.21

5. "/о	24,695	25	30	35	40
	—1,332	—1,35	—1.6	—1,9	- 2 , 2
6, ℃	—1,332	—1.4	—2,5	—3.5	—4.5

Оптические свойства океанической воды табл. (44.22—44.27) [28]

Таблица 44.22. Оптические свойства чистой воды при < = 20° С

„t-	«	о (90), 10–= м-'		10^= м			нм	”	да				
250	1,377	2,00	32,0	220	190	0,15	550	1,334	0,082	1,3	36	35	0,036
300	1,359	0,96	15,0	55	40	0,27	560	1,334	0,076	1,2	40	39	0,030
320	1,354	0,74	12,0	32	20	0,38	580	1,333	0,066	1,1	75	74	0,015
350	1,349	0,51	8,2	20	12	0,41	600	1,333	0,058	0,93	200	200	0,0046
400	1,343	0,30	4,8	11	6	0,44	620	1,332	0,051	0,82	240	240	0,0034
420	1,342	0,25	4,0	9	5	0,44	640	1,332	0,045	0,72	270	270	0,0027
440	1,340	0,20	3.2	7	4	0,46	660	1,331	0,040	0.64	310	310	0,0021
460	1,339	0,17	2,7	5	2	0,54	680	1,331	0,035	0,56	380	380	0,0015
480	1,337	0,14	2,2	5	3	0,44	700	1,330	0,031	0,50	600	600	0,0008
500	1,336	0,12	1,9	8	6	0,24	740	1,329	0,025	0,40	2250	2250	0,0002
520	1,335	0,10	1,6	16	14	0.10	750	1,329	0,024	0,39	2620	2620	0,0001
530	1,335	0,095	1,5	23	22	0,065	760	1,329	0,022	0,35	2560	2560	0,0001
540	1,335	0,088	1,4	30	29	0,047	800	1,328	0.018	0.29	2020	2020	0,0001

где Ф — поток nat гльного монохроматического излучения; *dl* — толщина облучаемого слоя объемом *dV. ûФ^* . , -ƏФ — элементар- ные потоки излуч I — соответственно рассеянны!!, ослабленный и поглощенный при прохождении *dV.*

Таблица 44.23. Спектральная плотность облученности Е^ , 10"® Вт/(см2.нм), поверхности моря при высоте Солнца *h* = 30°

Х. им		Х. им	^ x I	Х. нм		Х. им	
400	5,23	525	7,87	625	7,16	725	5,98
425	5.85	550	7.19	650	6.89	750	5.70
450	7,41	575	7,72	675	6,58	775	5,45
475	8,15	600	7,53	700	6,26	800	5.18
500	8,27						

Таблица 44.24. Спектральные показатели поглощения света океанической водой г., м-i

Место измерения	Глубина,	Длина волны, им									
		390	410	430	450	470	490	510	530	550	570
Саргассово море	0	0,041	0,034	0,025	0,016	0,014	0.018	0,023	0.039	0,050	0,067
Карибское море	0	0,20	0,090	0,034	0,023	0,016	0,014	0,014	0,023	0,032	0,055
Балтийское море (Готландская впадина)	0	0,71	0,48	0,34	0,23	0.15	0,090	0,064	0,064	0,032	0,055
Тихий океан	20	0,053	0,090	0,12	0,090	0,060	0,039	0,028	0,032	0,037	0,058
[Галапагосские острова)	200	0,067	0,062	0,044	0,034	0,025	0,014	0,014	0,028	0,032	0,058
(впадина Тонга)	10 000	0,058	0,037	0,023	0,012	0,009	0,009	0,016	0,025	0,032	0,055
Индийский океаи	0	0,062	0,041	0,030	0,032	0,016	0,016	0,016	0,030	0,039	0,055

и е. Для X > 570 1 ачения х практически не отличаются от значений х для чистой воды (см. табл. 44.23).

Таблица 44.25. Показатель полного молекулярного рассеяния Ом, 10"® м-i, океанической воды в зависимости от X, им

л	"м			X					
250	4,0	420	4,9	520	2,0	580	1,4	680	6,9
300	1,9	440	4,0	530	1,9	600	1,15	700	6.2
320	1,5	460	3,3	540	1,7	620	1,00	740	4,9
360	1,0	480	2,7	550	1,6	640	0,89	760	4,3
400	0,59	500	2,4	560	1,5	660	0.79	800	3.6

Таблица 44.26. Показатель полного молекулярного рассеяния

(у) для X = 546 нм

7, град	. . . .10;	1801	10;	170	20;	160	30;	150
10S м-1-ср-i	I 1,9	I	1,9	I	1.8	I	1.7	

Продолжение табл. 44.26

Т^^ град	90
6^^ 10^ м-1-ср-i ·	1,45 1,35 1 1,25 20 i 75 1,05 1,0

Таблица 44.27. Коэффициент преломления света в океанической воде в зависимости от волны X и солености S

л, нм	S, %0			
		10	20	30
667,8	1,33087	1,33271	1,33452	1,33726
587,6	1,33305	1.33491	1,33675	1,33951
501,6	1,33635	1,33824	1,34011	1,34293
447,2	1.33945	1,34138	1.34329	1.34616

Радиоактивность океанической воды (табл. 44.28—44.29) [28]

Таблица 44.28. Содержание естественных радионуклидов в верхних слоях океанической воды (5—100 м)

Радионуклид	Концентрация, г/см-»	Удельпая радиоактивность, Бк-см-»	Общее количество в океане, Ю» кг	Общая активность в океане, 3.7 10' Бк
«"К	4,5-10-s	1,2-10-2	63 000	460 ООО
8'Rb	8,4-10-8	2,2-10-^	118 000	8400
238U	2,0-10-s	1,0-10-«	2800	3800
236U	1.5-10-"	3.0-10-"	21	по
232JJ	10-»	1,0-10-'	14	8
22в^а	3,0-10-1"	3,0-10--	4,2-10-"	1100

Скорость звука в океане [30]

Наиболее простой для вычисления *с,* м/с, в зависимости от *t, °С,* и S, %о, является формула

$$c = 1450 - 4{,}206 / - 0{,}036 + 1{,}137\ S - 35.$$

Погрешность расчета минимальна при *i=* 10 °С и не превышает 1,5 м/с. При увеличении S и глубины скорость звука возрастает. При увеличении S на 1%о или глубины на 100 м скорость звука повышается на 1,2 и 1,6 м/с соответственно.

Таблица 44.29. Искусственная радиоактивность в океане (if-излучатели)

Радионуклид	Период полураспада, год'ы	Энергия, МэВ	Диапазон удельной активности, Бкем-"	
			Открытый океан	Места сбросов
i^Cs	30	0,67	5.10-7-10-=	10-6-10-2
«"Со	5,3	1,17-1,33		
103RU + Юбр-i	1,0	0,51	5.10-'_2-10-5	10-5-10-2
141C1 -4- 144C1	0.8	0,08-0,15	5.10-7-10-5	
"Сг	0,1	0,32		10-«_10-1
eezn	0.7	1,2		10-5-10-2
eszr + 85Nb	0,2	0,75	10-8-10-6	

Приращение скорости звука Лс/ при изменении *t* на 1 °С зависит от температуры:

	5	10	15	20	25	30
Дс/, м/с i	4,1	3.6	3.2	2.8	2,4	2,1

Номограммы значений скорости звука в морской воде приведены в [31].

Таблица 44.30. Нагревание слоя воды толщиной 1 м на различной глубине при поглощении 4186,6 Дж/см^

Залегание	Нагрев воды, К	
	чистой океанической	мутной прибрежной
0 - 1	6,24	7.72
1 - 2	0,610	0,960
5 - 6	0,236	0,120
10-11	0,104	0,014
20-21	0,040	0,000

В океане под гомогенным поверхностным слоем температура с возрастанием глубины сильно понижается (табл. 44.30), скорость звука также уменьшается, однако одновременное увеличение давления влечет за собой некоторое повышение скорости звука. В зависимости от стратификации температуры и солености на глубине 700—1300 м наблюдается минимум скорости звука. Отчетливые минимумы скорости звука отсутствуют там, где термическая стратификация незначительна.

44.4. АТМОСФЕРА

Строение атмосферы [32]

Атмосфера не является однородной. Особенно резко ее свойства изменяются по вертикали. По составу, температурному режиму, электрическим характеристикам атмосфера в вертикальном направлении может быть разделена на ряд слоев. Особенно отчетливо различия в свойствах этих слоев проявляются в распределении температуры.

Прилегающий к Земле слой — тропосфера — характеризуется уменьшением температуры с высотой (порядка 6 К/км) и кончается тропопаузой на высоте 7 км на полюсе и 17 км на экваторе. Выше лежит стратосфера, где температура возрастает приблизительно от 200 К в тропопаузе до 280 К в стратопаузе (на высо-

те 50 км). Далее следует мезосфера, где температура уменьшается с высотой, достигая 170—180 К на высоте около 85 км (мезопауза).

Эти три слоя: тропосфера, стратосфера и мезосфера.— характеризуются неизменным газовым составом и носят общее название гомосферы.

Начиная с 85 км температура атмосферы вновь возрастает вследствие поглощения ультрафиолетового излучения Солнца. Средний градиент температуры равен 20 К/км до высоты 150 км, а далее рост постепенно замедляется и заканчивается на высоте 300 км. Эта область атмосферы называется термосферой и заканчивается термопаузой, которая находится днем на высоте 350—450 км, а ночью опускается до высоты 200—250 км. Термосфера и лежащий над ней обширный слой метасферы носят общее название гетеросферы. Вследствие этого разделения на высоте около 750 км преобладает атомарный кислород, а на высоте 1500 км — гелий.

Разделение газов заканчивается на высоте несколько тысяч километров переходом к водородному составу атмосферы. Чтобы выделить область, где столкновения между молекулами не мешают их вылету за пределы земной атмосферы, вводят термин «экзосфера». Экзосфера лежит выше 700 км.

На высоте до 200 км по характеру изменения температуры атмосфера делится на 11 слоев. Общим свойством всех слоев является линейность изменения молекулярной температуры Гм, К, с геопотенциальной высотой Ф. Геопотенциальная **Ф** и геометрическая ***Z*** высоты связаны соотношением Ф=r1/{r+E), где r — средний радиус Земли

Молекулярная температура Ты связана с кинетической То зависимостью

где Мв и Мг — молекулярная масса воздуха на уровне моря и на рассматриваемой высоте соответственно. Для расчетов приняты следующие значения физических характеристик атмосферы на уровне моря и физических констант [32]:

барометрическое давление на географической широте ф= 45°32'40" при температуре ртути 273,15 К и средней ртути 13595,1 кг/м®

$$Рв = 1{,}01 \cdot 10^{5} \text{ Па (760 мм рт. ст.)};$$

температура /с=15 °С=288,15 К;

газовая постоянная сухого воздуха, Дж/(К-моль):

универсальная . . . . . , 8,31441

удельная 0,287055

динамическая вязкость воздуха при Т=273 К

(Хо= 1,75-10-8 кг-с/м^ = 1,7162-10**-5** Па-с.

ускорение свободного падения go=980,665 см/с^.

Барометрическая формула. Для определения разности высот Zi—Zi между двумя точками, давление в которых равно Рг и Pi, можно воспользоваться барометрической формулой Лапласа

$$Z_j - Z_i = 18\,400\,(1 + 0{,}00366\,t) \lg(P_i/P_j) \times$$

$$\times(1 + 0{,}00264\cos 2\varphi)\,(1 + 3{,}14 \cdot 10^{-7} h)\,\lg(P_i/P_g),$$

где Г /г,ё/Р — средние значения температуры, высоты над уровнем моря и отношения парциального давления *е* водяного пара к атмосферному Р. Если пренебречь зависимостью ускорения свободного падения от широты и высоты и считать воздух сухим, можно воспользоваться упрощенной барометрической формулой:

$$18\,400\,(1 + 0{,}00366\,T)\lg(P_i/P_j).$$

По многочисленным данным, полученным прямыми и косвенными методами, определены характеристики некоторой средней, или стандартной, атмосферы (табл. 44.31 -44.34) [33].

Таблица 44.31. Состав атмосферы

Газ	Объемное содержание, %	Молярная масса М, кг/кмоль
Азот N2	78,084000	28,01340
Кислород **О2**	20,947600	31,99880
Аргон **Ar**	0,934000	39,94800
Углекислый газ **СО2**	0,031400*1	44,00995
Неон **Ne**	1,818-10-6	20,18300
Гелий He	524,0-10-8	4,00260
Криптон Кг	114,0-10-6	88,00000
Ксенон Хе	8,7-10-8	131,30000
Водород На	50,0-10-8	2,01594
Окись азота NjO	50,0-10-8	44,01280
Метан **СН4**	200-10-8	16,04303
Озон О3	Летом до 7,0- 10-8*^ Зимой до 2,0.10-8*1	47,99820
Сернистый ангидрид SO^	До 100-10-8*1	64,06280
Перекись азота NO^	До 2,0-10-8*1	46,00550
Иод I2	До 1,0-10-8*1	253,80880
Воздух	100	28,96442*2

« Содержание газа может подвергаться существенным изменениям в зависимости от места и времени измерения.

Рассчитано по уравнению состояния идеального газа.

Таблица 44.32. Параметры атмосферы на среднем уровне моря

		Значение
Скорость звука, м/с	«е	340,294
Ускорение свободного падения, м/с^	ёс	9,80665
Масштаб высоты по давлению, м	"рс	8434,5
Средняя длина свободного пробега частиц воздуха, м	Ic	66,328-10-8
Молярная масса, кг/кмоль	Мс	28,964420
Концентрация частиц, м"»	Пс	25,471.10^^
Давление, Па	Рс	101325,0
Температура Кельвина, К	Тс	288,15
Средняя скорость частиц воздуха, м/с	Vc	458,94
Удельный вес, Н/м^	•/с	12,013
Кинематическая вязкость, м^/с		14,607-10-8
Динамическая вязкость, Па-с		17,894-10-8
Теплопроводность, Вт/(м-К)	к	25,343-10-3
Частота соударений частиц воздуха, с-1	"с	6,9193-10S
Плотность, кг/м»	Рс	1.2250

Таблица 44.33. Распределение молекулярной массы и температуры по высоте

Высо-	Молекулярная масса.	Температура, К		Градиент молекулярной температуры.
		молекулярная	кинетическая	
0	28,966	288,15	288,15	-0,00651122
11	28,966	216',66	216,66	0
25	28,966	216,66	216,66	0,00276098
46	28,966	247,00	247,00	0
54	28,966	274,00	274,00	—0,00349544
80	28,966	185,00	185,00	0
95	28,966	185,00	185,00	0.00500000
ПО	28,934	257,64	257,36	0,00801741
120	28,727	335,00	332,24	0,02345357
150	28,107	1010,00	980,05	0.01987408
160	27,900	1199,40	1155,26	0,00308461
170	27,700	1228,71	1175,00	0,00308461
180	27,476	1257,93	1193,20	0,00308461
190	27,245	1287,06	1210,60	0,00308461
200	27,000	1316,10	1226,80	0,00308461

Радиационный баланс атмосферы (табл. 44.35, 44.36)

Солнечная постоянная равна полному количеству излучения, падающего на площадку 1 см^, помещенную под прямым углом к солнечным лучам за пределами земной атмосферы на среднем расстоянии от Солнца до Земли [28]:

So = 8,122 Дж-см-2-мин= 1353 Вт-м-^.

Отражение солнечного излучения (табл. 44.37) [32]. Альбедо — интегральное отношение отраженного по всем направлениям потока к потоку, упавшему на отражающую поверхность Земли, близко к 40%, причем основной вклад (75 "о) вносит альбедо облаков, а наименьшее значение (7%) имеет альбедо земной поверхности. Остальную часть составляет альбедо атмосферы.

Поглощение лучистой энергии в атмосфере (табл. 44.38) [32]. Основную роль в поглощении лучистой энергии в атмосфере играют кислород, озон, углекислый газ, водяной пар и пыль. В целом атмосферой поглощается 17—25% солнечного излучения. Кислород имеет полосы поглощения главным образом в ультрафиолетовой части спектра. В видимой части поглощение происходит в полосах *А с* центром около 0,76 мкм и S с центром около 0,69 мкм, однако поглощение в них мало и слабо влияет на ослабление излучения.

Озон образуется в результате поглощения солнечного излучения (X_i<242,0 нм) на высоте от 10 до 60 км с центром поглощения на высоте около 22 км. Основные полосы поглощения озона лежат также в ультрафиолетовой области. Наблюдаемый у земной поверхности спектр обрывается на длине волны —300,0 нм. В этой области спектра поглощение озоном солнечного излучения составляет около 2—3% всего интегрального потока.

Наиболее важной полосой поглощения углекислого газа является широкая полоса 12,9—17,1 мкм, расположенная в максимуме теплового излучения атмосферы.

Важнейшее значение в поглощении лучистой энергии в атмосфере имеет водяной пар. Это определяется не только большим его содержанием, но и очень большим числом линий и полос в его спектре. Наибольшее значение из них имеют полосы, расположенные в инфракрасной области спектра.

В видимой области наиболее сильны две полосы: Я.~730ч-685 нм и «дождевая» полоса 606—585 нм.

Таблиц: 44.34. Отношения P/P^, p/p^ и , скорость звука, вязкость и теплопроводность атмосферы в зависимости от геометрической высоты

Геометрическая высота ft, м	*P/Pc*	P/Pc	*Vf.%*	Скорость звука о, м/с	Вязкость		Теплопроводность Л, 10-2 Вт/(м.К)
					динамическая щ Па с Ш->	"каГ-^м^/с	
-2000	1,26112	1,20666	1,09848	347,888	1,8515	1,2525-5	2,6359
-1500	1,19117	1,15218	1,07340	346,005	1,8361	1,3009—5	2,6106
—1000	1,12441	1,09966	1,04862	344,111	1,8206	1,3516-5	2.5853
-500	1,06073	1,04889	1,02416	342,208	1,8050	1,4048-5	2,5598
0	1,00000	1,00000	1,00000	340,294	1,7894	1,4607-5	2,5343
500	9,42130-1	9,52876—1	9,76154-1	338,370	1.7737	1,5195-5	2,5087
1000	8,87010-1	9,07477—1	9,52616-1	336,435	1.7579	1,5813-5	2,4830
2000	7,84618—1	8,21676-1	9,06464—1	**332,532**	1.7260	1,7147-5	2,4314
3000	6,92042—1	7,42248—1	8,61538-1	**328,584**		1,8628-5	2,3795
4000	6,08541-1	6,68854-1	8,17835—1	324,589	l^6612	2,0275-5	2,3273
5000	5,33415-1	6,01166-1	7,75349-1	320,545	1.6282	2,2110-5	2,2747
6000	4,66002-1	5,38866-1	7,34075—1	316,452	1.5949	2,4162—5	2,2218
7000	4,05677-1	4,81648-1	6,94008-1	312,306	1,5612	2,6461-5	2,1687
8000	3,51854-1	4,29113-1	6,55144-1	308,105	1,5271	2,9044-5	2,1152
9000	3,03979-1	3,81276-1	6.17475-1	303,848	1,4926	3,1957-5	2,0614
10000	2,61533-1	3,37559-1	5,80999-1	299,532	1,4577	3,5251—5	2,0072
15000	1,19534-1	1,58983-1	3,98727-^1	295,069	1,4216	**7,2995—5**	1,9518
20000	5,45699-2	7,25793—2	2,69405-1	295,069	1,4216	**1.5989-4**	1,9518
30000	1,18137—2	1,50286-2	1,22591—1	301,709	1,4753	8,0134—4	2,0345
40000	2,83388-3	3,26176-3	5,71119-2	317,189	1,6009	4,0067—3	2,2313
50000	7,87354—4	8,38264—4	2,89528-2	329,799	1,7037	1,6591—2	2,3954
60000	2,16714—4	2,52797—4	1,58996—2	315,073	1,5837	5,1141—2	2,2041
70000	5,15261-5	6,76150—5	8,22283—3	297,061	1,4377	1,7358—1	1,9765
80000	1,03871—5	1,50678-5	3,88172-3	282.538	1,3208	7,1558-1	1,7987

запись вида 5,15261—5

Таблица 44.35. Спектральная интенсивность солнечного излучения на верхней границе атмосферы So, ВТ-СМ-2.МКМ, в зависимости от К нм [28]

л	So	л	s_{λ}	А	So
0,22	0,0057	0,45	0,2006	0,80	0,1107
0,23	0,0067	0,46	0,2066	0.90	0,0889
0.24	0,0063	0,47	0.2033	1.00	0,0746
0,25	0,0070	0,48	0,2074	1,20	0,0484
0,26	0,0130	0,49	0.1950	1,40	0,0366
0,27	0,0232	0,50	0,1942	1.60	0,0244
0,28	0,0222	0,51	0,1882	1.80	0,0159
0,29	0.0482	0,52	0,1833	2,00	0,0103
0,30	0,0514	0,53	0,1842	2,20	0,0079
0,31	0,0689	0,54	0,1783	2,40	0,0064
0,32	0,0830	0,55	0,1725	2,60	0,0048
0,33	0,1059	0,56	0,1695	2,80	0,0039
0,34	0,1074	0.57	0,1712	3.00	0.0031
0,35	0,1093	0.58	0,1715	3,20	0.0023
0,36	0,1068	0.59	0,1700	3,40	0.0017
0,37	0,1181	oieo	0,1666	3.60	0,0013
0,38	0,1120	0,62	0,1602	3.80	0.0011
0,39	0,1098	0,64	0,1544	4.00	0.0009
0,40	0,1429	0,66	0,1486	4,50	0,0006
0,41	0,1751	0,68	0,1427	5,00	0,0004
0,42	0.1747	0,70	0,1369	6,00	0,0002
0,43	0,1639	0,72	0,1314	7,00	0,0001
0,44	0,1810	0.75	0,1235		

Таблица 44.36. Средний радиационный баланс Северного полушария при средних условиях облачности [34]:

Составляющие радиаи

Инсоляция коротковолновым излучением на верхней границе атмосферы . . . .
Поглощение излучения в атмосфере:
общее
озоном
водяным паром и пылью
облаками
Отражение и рассеяние излучения в мировое пространство:
общее
атмосферой
облаками
земной поверхностью
Поглощение излучения земной поверхностью:
общее
прямое солнечное
пропущенное облаками
рассеянное
Длинноволновое излучение (общее)
Эффективное излучение земной поверхности:
тепловое
обратное излучение атмосферы . . .
эффективное
Тепловое излучение тро:
поглощенное т,
собственное
Тепловое излучени в мировое пространство:
земной поверхности
тропосферы
стратосферы

Таблица45.10.Характеристикиспутниковиихорбит[11](вскобкахуказаны

Поверхность	A-bg». 1	Поверхность	Альбедо,
Черноземы:	1	Вспаханное поле:	
сухой-	14	сухое	8-12
влажный	8	влажное	5-7
Серозем:		Рожь и пшеница	10--25
сухой	25—30	Трава:	
влажный	10-12	свежая	26
Глина синяя:		высохшая	19
сухая	23	Древесная расти-	10-18
влажная	16	•тельность	
Песок желтый:			
сухой	35		
серый	18-23		
речной	43		

Таблица 44.38. Полосы поглощения водяного ***пара***

Полоса . . .	*a*		р	or	«F	*Q*
Центр полосы X, мкм . . .	0,72	0,82	0,93	1,13	1,38	1.86
Полоса		0)2	*X*	-	f	
Центр полосы X, мкм . . .	2,01	2,05	2,68	3,2-4.0	4.0	—4,9

Электрические явления в атмосфере [32]

Ионы в атмосфере. В результате ионизации газов, входящих в состав атмосферы, образуются первичные (молекулярные) ионы и устойчивые комплексы из 10—15 молекул (легкие ионы). Путем присоединения легких ионов к частицам аэрозоля образуются более крупные — ионы тяжелые и ультратяжелые. Обнаруживаются также средние илн промежуточные ионы (табл. 44.39, 44.40), природа которых не вполне ясна.

Таблица 44.39. Основные группы атмосферных ионов [35]

Группа ионов	Подвижность. СМ2/(В • с)	Радиус иоиа, нм
Легкие	10-2-1	0,66-8
Средние	10-3—10-2	8-25
Тяжелые	10-3—2,5-10-8	25-55
Ультратяжелые	<2,5-10-3	>55

Капли тумана и облачных элементов имеют размеры 10-^—10-^ см и могут иметь заряд, но к числу ионов обычно не относятся. Как правило, каждый иои несет один элементарный заряд, если его радиус меньше 10-<^ см.

Из многочисленных известных ионизаторов главнейшими для нижних слоев атмосферы являются излучения радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и атмосфере (табл. 44.41), а также космические лучи. Над океанами основным ионизатором является космическое излучение.

Электрическое поле в атмосфере. Почти всегда вертикальная составляющая электрического поля в ат-

Таблица 44.40. Среднее число ионов, возникающих за I с в I см^ воздуха [35]

Расположение воздушной	Ионизатор		Сумма
	Излучение радиоактивных элементов	Космическое излучение	
	почвы 1 воздуха		
Над сушей	4,0 4,6	1,5-1,8	10,1-10,4
Над океаном		1,5-1,8	1,5-1,8

44.41. Концентрация космогеиных нуклидов в приземном слое воздуха [28]

Нуклцд	Коицеитрация, 3.7 • 10»» Бк • м-8	Нуклид	Концентрация, 3.7 • 10»» Бк • м-»
14С	5-10-1='	25S	10-15
'Be	(2—32)-10-1*	32p	2-10-18
m	10-13-10-W	22Na	10-1'

мосфере значительно превосходит его горизонтальные составляющие, что соответствует отрицательному заряду земной поверхности. Средняя поверхностная плотность электрического заряда Земли равна ***dQldS***= =—1,15-10-'® Кл-см-2. Полный заряд Земли равен 5,7-105 Кл. Приведенные значения получены в предположении, что средний вертикальный градиент электрического потенциала у земной поверхности равен 130 В/м

Электрические заряды осадков. Частицы осадков всех видов несут на себе электрические заряды '(табл. 44.42), которые возникают в результате нескольких групп процессов электризации, в числе которых соударение поляризованных частиц, захват частичками остатков воздушных ионов, разбрызгивание капель воды, электризация при изменении агрегатного состояния.

Таблица 44.42. Электрический заряд ***Q*** осадков различного происхождения и ток I, создаваемый ими

Характер осадков	<Зср. кл	Стах-Кл	'ср. А	'шах. А
Обложной дождь	10-16—10-««	5-10-13	5-10-15	5-10-W
Ливневый дождь	10-и_ 10-12	5-10-12	10-14	5-10-18
Град	10-" –	10-10	–	10-11
Снег	10-12—10-11	5-10-11	**10**-м	5-10-13

Заряд отдельных капель меняется в очень широких пределах. Число положительно заряженных капель в среднем в 1,5 раза больше числа отрицательно заряженных. Это отношение меняется от 1 : 1 до 3 : 1. В то же время средний отрицательный заряд на одну каплю (1,3-10-'2 Кл) больше положительного (1,М0-'2 Кл). Капли обложного дождя заряжены до 0,5—10 В, грозового ливня — до 300 В при среднем значении 40 В.

Стратификация атмосферы в зависимости от степени ионизации [35]. Наблюдения за распространением радиоволи показали, что газы, образующие атмосферу, ионизированы. Известны четыре регулярно наблюдаемых более или менее ярко выраженных слоя: ***D. E.*** и fj.

Слои ***E и p2*** непрерывны и простираются над всем земным шаром, а слои ***D и F,*** появляются лишь в определенное время суток и года. Кроме того, . в области непрерывных слоев £ и f2 время от времени появляются спорадические слои, представляющие собой отдельные облака с большой концентрацией ионов и электронов. Нижняя граница ионосферы совпадает с началом слоя ***D.*** Число электронов в 1 см" составляет несколько тысяч. Слой ***D*** отражает длинные (в несколько километров) волны; при наклонном падении частично отражает и заметно поглощает короткие волны 30—100 м и сильно поглощает волны длиной 100-500 м. На высоте от 85—90 до 130—140 км располагается слой £• —постоянно существующая область ионизации с максимумом концентрации электронов (до ~2.10+ь см-з) на высоте 120—130 км. Ночью концентрация электронов уменьшается до 5-10® см-®. Слой Б днем отражает и заметно поглощает волны длиннее 10 м, а при наклонном падении отражает более короткие волны (15—10 м). На уровне максимальной концентрации электронов слоя ***E*** находится нижняя граница полярных сияний.

На высоте 200—500 км в области слоев ***F,*** и ***F2*** наблюдается наибольшая концентрация электронов. Слой ***F,*** образуется только летом в дневные часы в нормальных условиях на высоте 180—220 км. Максимальная концентрация электронов в слое ***F,*** составляет (2т-5)-105 см-5. Слой Fi существенно влияет на распространение коротких волн. Максимальная концентрация электронов в слое F2 составляет несколько миллионов в 1 см^. Высота зоны максимальной концентрации 200—400 км. Состояние слоя Fi оказывает большое влияние на распространение радиоволн в диапазоне 10—200 м. Выше максимума слоя fz концентрация ионов и электронов очень медленно уменьшается с высотой, приближаясь на высоте 2000—3000 км к концентрации межпланетного газа (10®—10® см-®).

Ионизация верхней атмосферы в сильной степени определяется влиянием Солнца; степень ионизации изменяется со временем суток, с сезоном и фазой цикла солнечной активности. Сильное влияние на ионизацию оказывает также бомбардировка атмосферы частицами солнечного происхождения, вызывающими магнитные бури и полярные сияния Область ***E*** предположительно соответствует области диссоциации О2—>-0-f0, а область ***D*** — ионизации О2, соответствующей первому потенциалу ионизации. Максимумы ионизации областей ***F,*** и ***Fi*** располагаются примерно на высоте 200 и 272 км соответственно. В течение ночи области ***F,*** и ***F^*** сливаются, образуя один слой ионизации. Слой ***D*** ночью исчезает, а слой ***E*** заметно рассасывается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geodetic Reference System 1967. Publication speciale du Bulletin geodesique. Paris: Bureau Central de l 'AIG, 1970. P. 116.

2. Moritz H. Special Study Group 5.39. Fundamental geodetic constants. Trav. de l'AIG, t. 25, Rapports generaux et rapports techniques XVI Ass. Generale, Sept 1975, Paris. 1976. P. 411—418.

3. Морозов В. П. Курс сфероидической гравиметрии: М.: Недра. 1979.

4. Гутенберг Б. Физика земных недр: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.

5. Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и развитие: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.

6. Космииская И. П./ХВестник АН СССР. 1965. Т. 2. С. 51.

7. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1978. С. 126—127.

8. Польдерварт А.//Земная кора: Пер с англ. М.з Изд-во иностр. лит., 1957. С. 130—135.

9. Берн Ф. Там же. С. 114-117.

10. Ферсман А. Е. Геохимия. М.: Объединенное науч.-техн. изд-во, 1933—1939. Т. 1—4.
11. Чердынцев В. В. Распространенность химических элементов. М.: Гостехиздат, 1956.
12. Веселое К. Е., Сагитова М. У. Гравиметрическая разведка. М.: Недра, 1968.
13. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985.
14. Саваренский Е. Ф., Лириос Д. П. Основы сейсмологии и сейсмометрии М.: Гостехиздат, 1954.
15. Эйби Дж. А. Землетрясения: Пер. с англ. М.: Недра, 1982.
16. Проскурякова Т. А., Рыкунов Л. Н. Международный геофизический год. М.: Наука, 1963. Т. 5.
17. Helton B. S., Jonson D. P.//Proc. JBB. 1962. Vol. 50, N 11. P. 2328.
18. Яновский Б. М. Земной магнетизм. М.: Гостехиздат, 1953.
19. Почтарев В. И. Нормальное магнитное поле Земли. М-. Наука, 1984.
20. Справочник по переменному магнитному полю Земли. Л.: Гидрометеоиздат, 1954.
21. Краев А. П. Основы геоэлектрики. Л.: Изд-во ЛГУ, 1950.
22. Виноградов П. А.//Геология и геофизика. 1963. № 12. С. 111—115.
23. Любимова Е. А. Тектоносфера Земли. М.: Наука, 1978.
24. Jacobs J. B. The Earth Interior. Encicl. of Phisics. Ed. E. S. Flugge. Berlin: Springer Verlag 1956. Vol. 47.
25. Будыко М. И., Кондратьев И. Я.//Космические исследования. 1964. Т. 2, вып. 1. С. 62—68.
26. Елизаров А. А. и др. Океанологические основы рыболовства. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.
27. Бруевич С. В. Элементарный состав воды Мирового океана/Др. Ин-та Океанологии АН СССР. М.: Наука, 1948. Т. 2.
28. Физика океана. Гидрофизика океана/Пс.д ред. А. С. Монина. М.: Наука, 1978.
29. Дитрих Г., Колле К. Общее мореведение: Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1961.
30. Гусев А. М. Основы океанологии. М.. Изд-во МГУ, 1983
31. Барре Л. С. Таблица скорости звука в морской воде. М.: Изд. ВЦ АН СССР, 1961
32. Тверской П. Н. Курс метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1962.
33. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: Изд-во стандартов, 1981.
34. Аверкиев М. С. Метеорология. М.: Изд-во МГУ, 1960. Т. 2.
35. Николе Л. Аэрономия: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1964.

ГЛАВА 45

АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

Ю. Э. Любарский, Р. А. Сюняев

45.1. НЕКОТОРЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ И ПОСТОЯННЫЕ [1]

Наиболее часто используются следующие единицы:
астрономическая единица, 1 а.е. = 1,495989(1)Х X10" м;
парсек, 1 ПК=3,085778-Ю»® м;
световой год, 1 св. год=9,460530-10'= м;
тропический год (от равноденствия до равноденствия), троп. год=31 556 926 с=365,24219 сут;
Янский (единица спектральной плотности потока), 1 Ян=10-2« Вт/(м2-Гц).

Звездные величины [1—3]. Отношение освещенностей *Ɛ*(и Ez, создаваемых двумя звездами, связано с их звездными величинами ***m,*** и Шг соотношением

Абсолютная звездная величина M равна видимой звездной величине т, которую имел бы объект, находясь на расстоянии 10 пк:

$$M = m + b - S \lg r,$$

где г — расстояние, пк.

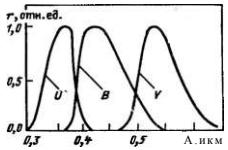


Рис. 45.1. Кривые пропускания фильтров *V, B, V* [3]

Поскольку получаемая от объекта энергия всегда измеряется в конечном интервале длии волн, обозначения видимых звездных величин снабжаются индексами, указывающими, в каком спектральном интервале проводилось измерение Основной является трехцветная фотометрическая система ***UBV, в*** которой используются три стандартных спектральных интервала — ультрафиолетовый ***(U),*** голубой ***(B)*** и визуальный ***(V)*** (рис. 45.1). Цвет звезды характеризуется разностью между звездными величинами, измеряемыми в различных диапазонах, например B—V или U—B. Звезда спектрального класса АО имеет U—6=B—V=0. В настоящее время система ***UBV*** расширена в инфракрасный диапазон (табл. 45.1).

Звездная величина, соответствующая полному потоку энергии от объекта, называется болометрической

Таблица 45.1. Система стандартных фотометрических полос [3]

Полоса	Эффективная длина^волиы.	Эффективная ширина, мкм	Плотность потока, соответствующая т = 0, Ян
и	0,36	0,04	1880
в	0,44	0,10	4440
V	0,550	0,08	3810
R	0,700	0,21	ЗОЮ
I	0,88	0.22	2430
J	1,25	0,3	1770
К	2,2	0,6	630
L	3,5	0,9	310
М	5,0	1,1	180
N	10,4	6.0	43

ть. Светимость звезды с Мй=0 равна 2,97-10=8 Звезда с mt=0 создает на границе земной атмосферы поток энергии плотностью 2.48-10-8 Вт/м^. Звезда с mv=0 создает на границе земной атмосферы освещенность 2,54-10-« лк.

Приведены астрономические символы:

©	*Солнце*	*i, ф*	*Земля*	*§*	***Уран***
С	***Луна***	*сГ*	*Марс*	t|t	***Нептун***
^	*Меркурий.*	*Ч*	*Юпитер*	*si*	***Плутон***
§	*Венера*	\	*Сатурн*	^	***Комета***
Т	№«,0"	*SI*	*ЛеВ,ПО°*		***Стрелец^^***
W	*Телец, 30°*	*Щ*	*ДеВа,15а°*	*%*	*Козерог,270′*
^	*Близнецы, ео′*		*Весы, 180°*		
О	*Ро.к,90°*	*ГЧ*	*Скорпион,210"*	*Yi*	*Рыба, 330"*

Координаты иа небесной сфере [2]. Перечислим основные точки и системы координат на небесной сфере.

Северный и южный полюсы мира — точки пересечения небесной сферы с продолжением земной оси в северном и южном направлениях.

Зенит и надир — точки пересечения небесной сферы с продолжением линии отвеса в точке наблюдения вверх и внр.

Небесный экватор — большой круг, образуемый пересечением небесной сферы с плоскостью земного экватора.

Эклиптика — видимый путь Солнца по небесной сфере. Наклонена под углом е=23°27' к плоскости небесного экватора.

Точки весеннего равноденствия Y — точка пересечения эклиптики с небесным экватором, которую Солнце проходит при движении из южного полушария в се-

Галактический экватор — круг, образуемый пересечением небесной сферы с продолжением плоскости Галактики. Наклонен к плоскости небесного экватора под углом 62"36'.

Северный полюс Галактики: точка пересечения небесной сферы с продолжением оси вращения Галактики в северном^напр^авленИИ Экваториальные координаты

Галактический центр имеет экваториальные координаты а=17Ч2"•24^ 6= —28'=55'.

Экваториальная система координат (рис. 45.2). ***Склонением Ь*** светила называется угол, выражаемый в в градусах и отсчитываемый от небесного экватора до СБетила вдоль ***круга склонения*** (большого круга, проходящего через полюса мира и светило). Склонение считается положительным, если светило находится в северной полусфере. ***Прямым восхождением*** а называется

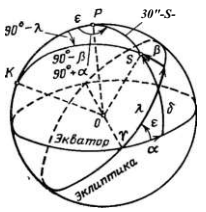


Рис. 45.2. Основные точки и координаты на небесной сфере: *К, Р, S.* о —полюс эклиптики, северный полюс мира, положение тела и положение наблюдателя [21

угол, выражаемый в градусах (или часовой мере) и измеряемый от точки весеннего равноденствия вдоль небесного экватора в направлении от юга к востоку до точки пересечения небесного экватора с кругом склонения, проходящим через светило.

Эклиптическая система координат (рис. 45.2) ***Астрономической широтой*** р светила называется угол в градусах, измеряемый между эклиптикой и объектом вдоль ***круга астрономической широты*** (большого круга, проходящего через полюсы эклиптики и объект). Астрономическая широта считается положительной к северу от эклиптики. ***Астрономической долготой 'к*** называется угол в градусах, измеряемый вдоль эклиптики через юг к востоку между точкой весеннего равноденствия и точкой пересечения эклиптики с кругом астрономической широты, проходящим через объект.

Галактическая система координат. Галактической широтой Ь светила называется угол, выражаемый в градусах и измеряемый вдоль круга ***галактической широты*** (большого круга, проходящего через галактические полюсы и светило) между галактическим экватором и светилом. Галактическая широта считается положительной к северу от галактического экватора. ***Галактической долготой I*** называется угол, выражаемый в градусах и измеряемый вдоль галактического экватора от галактического центра в направлении через юг к востоку до точки пересечения с кругом галактической широты, проходящим через светило.

45.2. СОЛНЦЕ

Приведем основные характеристики Солнца [1] (см. также рис. 45.3—45.5):

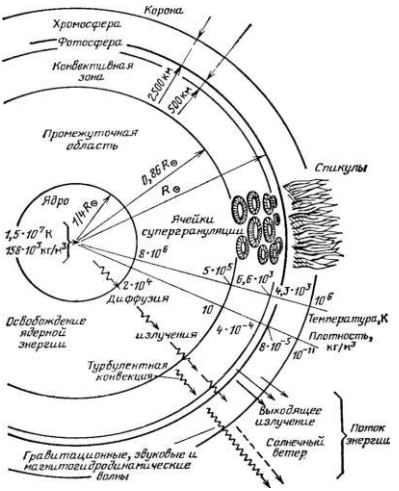


Рис. 45.3. Строение Солнца (масштаб не соблюден) [5]

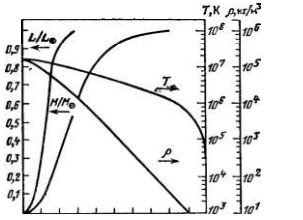


Рис. 45.4. Модель внутреннего строения Солнца [5]

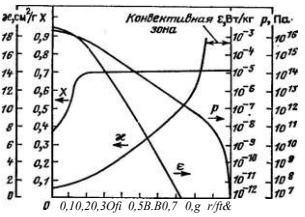


Рис. 45.5. Свойства солнечного вещества (X — доля водорода по массе, у. — непрозрачность, е — скорость энерговыделения, р — давление) [5]

радиус /?о =6,9599(7) -Ю'» см;
масса Мо = 1,989(1)-10=^3 г;
средняя плотность р 1,409 г/см^;
сидерический период (относительно неподвижных звезд) вращения (на широте ф=17°) 25,38 сут;
синодический (относительно Земли) период 26,75+5,7 sin=(p сут;
наклон экватора к плоскости эклиптики 7°15';
ускорение свободного падения на поверхности 2,740-10^ см/с2;
средняя магнитная индукция вблизи полюсов при минимуме пятен (1—2) -Ю-^ Тл;
диаметр на среднем расстоянии от Земли

Солнце имеет следующее положение в Галактике [1]:
расстояние от галактического центра (10±0,8) кпк;
)асстояние от галактической плоскости к северу от нее 8±12) пк.
Солнце движется относительно ближайших звезд со скоростью 15,5 км/с в направлении а=17"40"', 6= +2Г [4]; скорость вращения вокруг центра Галактики 250 км/с.
Солнце как звезда имеет следующие характеристики [1]:
tnv= —26,74; Mv^ +4,83;
/пв= —26,09; +5,48;
—25,96; +5,61;
/Пг,= —26,82; Мг,= +4,75;
спектральный класс G2V; температура 5770 К; возраст 5-105 лет.

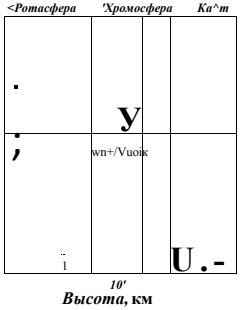


Рис. 45.6. Температура *Т* и концентрация электронов *Ne,* ионов Л'ион и нейтронных атомов *N^r* в атмосфере Солнца. Высота отсчитывается от уровня единичной оптической толщины на длине волны 0,5 мкм [5]

Структура солнечной атмосферы (рис. 45.6) такова. ***Фотосфера*** — слой толщиной около 500 км, в котором формируется непрерывное излучение со спектром, близким к спектру излучения черного тела На это излучение накладываются узкие линии поглощения — фраунгоферовы линии (табл. 45.2).

Хромосфера — переходная область между фотосферой и короной толщиной порядка 10^ км. Излучает в линиях, которые наблюдаются во время затмения.

Корона — верхняя часть атмосферы Солнца, переходящая непосредственно в межпланетную среду. Высокая температура (порядка 10® К) короны поддерживается за счет энергии, выделяющейся при диссипации поднимающихся из фотосферы магнитных полей и диссипации звуковых и альфвеновских волн, возбуждаемых конвекцией в фотосфере. Электроны распределены в короне по закону [7]

$$N^ = 108\ (0{,}036/r''®+ 1{,}55/гв + 2{,}99/г1в).$$

Здесь Ne — плотность электронов, см-5; г — расстояние от центра солнца, Л© Свечение короны в непрерывном спектре обусловлено рассеянием света Солнца иа электронах. Наблюдаются сильные запрещенные линии высокоионизованных тяжелых элементов (табл. 45.3). Соответствующие переходы запрещены правилами отбора в дипольном приближении, поэтому их верхние состояния являются метастабильными, В обычных условиях они девозбуждаются столкновениями, но в среде малой плотности столкновения редки и девозбуждение происходит с излучением запрещенного кванта. Излучательная способность короны характеризуется ее мерой эмиссии стандартное значение меры эмиссии короны равно 4,4-10^® см-^. Полный световой поток от короны за пределами 1,3 при максимуме пятен составляет 1,3-10-® полного потока от Солнца, при минимуме пятен — 0,8-10-® солнечного потока [1].

Наблюдаются вертикальные колебания атмосферы Солнца с периодом 5 мин. Их горизонтальный масштаб составляет 5000 км, амплитуда — около 0,4 км [5]. Некоторые данные указывают на колебания всей атмосферы Солнца или значительной ее части с периодом 160 мин [8]. Характеристики многочисленных нестационарных образований в атмосфере Солнца приведены в табл. 45.4.

Таблица 45.2. Самые сильные фраунгоферовы линии в спектре Солнца [5]

Длина волны.	Эквивалентная ширина	*Wlh.*	Поглощающий
358,1209	0,2144	5,99-10-«	Fel
371,9947	0,1664	5,34-10-''	Fel
373,4874	0,3027	9,45-10-«	Fel
373,7141	0,1071	4,28-10-'	Fel
374,5574	0,1202	4,59-10-'	Fel
374,9495	0,1907	5,78-10-«	Fel
375,015	0,1388	4,30-10-'	HI
375.8245	0,1647	4,97-10-'	Fel
377,063	0,1860	6,21-10-<	HI
379,790	0,3463	10,85-10-'	HI
382,0436	0,1712	5,12-10-^	Fel
382,5891	0,1519	4,21-10-^	Fel
383,2310	0,1685	6,00-10-^	Mgl
383,539	0,2362	7 19-10-^	HI
383,8302	0,1920	6,41-Ю-^	Mgl
385,9922	0,1554	4,00-10-^	Fel
388,905	0,2346	7,22-10-^	HI
393.3682	2,0253	48,74.10-«	Call
396,8492	1,5467	34,35-10-4	Call
397,0076	0,3076	7,76-10-4	Hie
410,1748	0,3133	7,46-10-4	HI B
434,0475	0,2855	6,59-10-4	HIT
486,1342	0,3680	7,50-10-4	нг^
656.2808	0,4020	6,49-10-4	HI a

* Эквивалентная ширина — ширина соседнего с линией участка непрерывного спектра, энергия которого равна энергии, поглощенной в линии.

Таблица 45.3. Некоторые линии излучения короны в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах [5]

Переход	Ион	Длина волны,	Эквивалентная ширина, им
	Ni XVI	360,1	0,13
	Fe XIV	530,3	2.00
	Fe XIII	338,8	1,00
	Fe XIII	107,98	3,00
	Ni XV	670.2	0.12
	Fe XIII	1074,7	5,00
	Fe XI	789.2	0,60
	Fe X	637,4	0,50

Излучение Солнца характеризуют следующие величины [1]:

полная светимость / ©-3,826(8) • 10=6 Вт;

поток излучения с единицы поверхности 6,284 X XI O' BT/ms

Таблица 45.4. Характеристики образований в солнечной атмосфере [1, 3, 5]

Образование	Размеры, км	Время жизни	Температура, К
Солнечные пятна	2000—105.	I сут-10 мес	4200 (тень) 5700 (полутень)
Гранулы	10^	10 мин	*T* (гранулы) - Г (промежуток между гранулами) = 300 к
Ячейки супергрануляции	(2^4). 104	20 ч	—
Спикулы	1000 (горизонтальный); 7000 (вертикальный)	10 мин	**(1 -^4) • 104**
Факелы	5 -10» км	10 сут	7-(факел)-Г (фотосфера) = 1000 К
Протуберанцы	30 000 (высота) 20 000 (длина) 5000 (ширина)	2 мес	(6 -ь 8) • 10»

сила света 2,84-10=' кд;

освещенность, создаваемая Солнцем вне атмосферы Земли на среднем расстоянии Земли от Солнца, 127 ООО лк;

солнечная постоянная (полная мощность излучения, которое падает на площадку единичной площади, помещенную вне атмосферы Земли на среднем расстоянии Земли от Солнца) 1373(20) Вт/м^.

Спектр Солнца показан на рис. 45.7—45.10. Большая часть излучения приходит от фотосферы. В коротковолновой области (?.^100 им) спектр состоит из эмис-

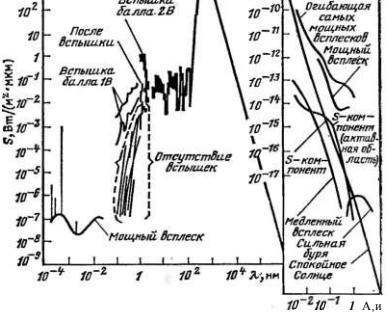


Рис. 45.7. Спектр Солнца [9]:

V, рентген УФ, О, ИК, радио — у-. рентгеновский, ультрафио-

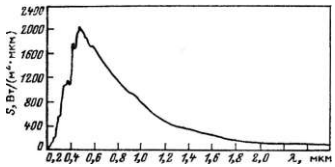


Рис. 45.8 Спектр Солнца (Х=0,2ч-2,6 мкм) [5]

сионных линий многочисленных ионов, образующихся в хромосфере и короне.

Радиоизлучение Солнца в спокойном состоянии обусловлено тепловым излучением короны. На длинах воли Я>1 м яркостная температура излучения равна температуре электронов в короне (около Ю® К). На меньших длинах воли корона становится прозрачной и ее яркостная температура убывает. При см доминирует тепловое излучение хромосферы. Наблюдается также медленно меняющееся тепловое излучение (5-Ж)мпоиент), интенсивность которого хорошо коррелирует с площадью солнечных пятен. Характеристики различных типов сильно нестационарного излучения, обусловленного взрывным выделением энергии в активных областях солнечной атмосферы, приведены в 45.5, 45.6.

Поток нейтрино от Солнца равен 2,1(3) солнечных нейтринных единиц [6] (1 солнечная нейтринная единица соответствует 10-зб поглощений за 1 с на 1 атом С1 в реакции v - i - ® ' С l — П о с к о л ь к у энергетический порог этой реакции составляет £v =0,814 МэВ, регистрируются только самые энергичные нейтрино, возникающие иа Солнце в реакции ®В—>-®Be*-fe+-l-v. Основной поток солнечных нейтрино генерируется в реакции ***p+p***—>-^H-f-e++v, однако энергия этих нейтрино ***Ev*** <0,420 МэВ, и они не регистрируются).

Солнечный цикл [5]. Степень активности Солнца характеризуется числом Вольфа

$$W=lOg+f,$$

где g — число групп пятен; f — число солнечных пятен. Средняя продолжительность пятнообразовательного цикла (цикл активности Солнца) — 11,04 года (рис. 45.11). Наблюдались длительные периоды, когда пятнообразование прекращалось. Последний из них — маундеровский минимум — продолжался с 1645 по

45.3. ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ, МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА [1]

Основные сведения о планетах Солнечной системы (см. также табл. 45.7—45.9, рис. 45.12, 45.13):

масса Земли Мф =5,976(4) • Ю®' г;

экваториальный радиус Земли/?0=6378 км (о фигуре Земли см. гл. 44);

общая масса: '

планет Солнечной системы 447,8

спутников планет 0,12 Л10;

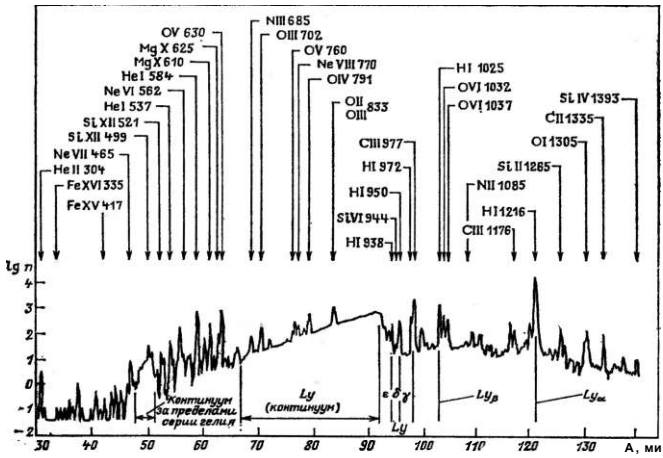


Рис. 45.9. Спектр Солнца в ультрафиолетовом диапазоне [5]:
n —число импульсов за 0,08 с

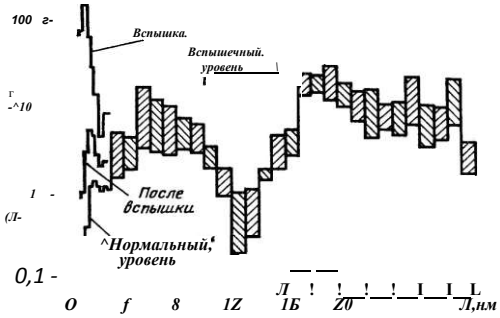


Рис. 45.10. Спектр Солниа в рентгеновском диапазоне [9]

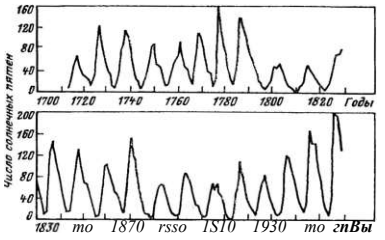
Таблица 45.5. Средние характеристики радиовсплесков [!0]

Характеристика	Микроволновые всплески			Всплески в метровом диапазоне								
	импульсные	постепенные		1™3т	*WmpfmA*	IVraB	Шумовые бури континуум		типа II	типа III		хипаУ
Диапазон частот, МГц	>1000			-150-1500	<200		<500		<200	<500		<200
Частота всплесков в максимуме солнечной активности	<1 Ч-1	>1 сут-1	-1—10 в месяц, очень интенсивные всплески происходят в максимуме солнечной активности				-1-3 в неделю	>!03ч-з	0,5 сут-1	3 Ч-1 (группами)		1 Ч-1
Ширина полосы, МГц	-500-50 000		-5000-50 000	1000	>200 '	<200	<500	>4	~5	50-100		
Продолжительность	<10 мин	>10 мин	От Юмин до нескольких часов			До нескольких часов	Часы или сутки	<1 с (группы -0,5 мин)	5-30 мин	<10 с (группы 1 мин)		<1 мин
Яркостная температура, К	-10"—101«	<10«	<10»	10^-108		<10'«		>10"	<108—104			
Круговая поляризация	Отсутствует или частичная		Частичная	Частичная, сильная	Слабая	Очень сильная			Очень слабая	Частичная		
Линейная поляризация	Слабая	-	Частичная	10%		-	Очень слабая			Данные некадежны		
Угловой размер источника, град	1—4	1-2	2-4	3-5	6-12	2-6	2-10	1—6	6->30	3-12		

Таблица 45.6. Характерные значения полной энергии, *E*, Дж, и мощности *F*, Вт, выделяемых в различных каналах для больших и малых солнечных вспышек [3]

Канал	Самые большие вспышки		Субвспышка	
	E	*F*	*E*	*F*
Излучение:				
длинноволновое рентгеновское и ультрафиолетовое		(3^5). 10"	(1^3)-1022	(1--3).102'>
оптическое непрерывное	(1-^3)-102«	(1-4-3)-lO^i		
в линии *На*	(1H-3).102s	(1-4-3)-!0'«	1O's	3-10W
коротковолновое рентгеновское	(3-^5)-101"	(3-4-5)-!0'«		(1-4-3)-101S
в 7-диапазоне	(1-^3)1018	(1-4-3)-10'»		
в радиодиапазоне	- 1 0 "	- 1 0 "	(1-4-3)-10"	1013
Ускоренные частицы:				
электроны (>20 кэВ)		(3-4-5)-10«		1018
протоны (>20 МэВ)	(1-4-3)-102«	(1-4-3). 1021		
Гидродинамические движения плазмы:			1020 *	
межпланетные выбросы и ударные волны	(1-4-3)-10^®			
движение над хромосферой	1025	1022	,022	1019

• Для подавляющего большинства субвспышек отсутствует.



Изменение числа Вольфа со временем [5]

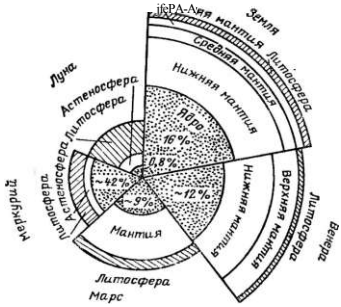
астероидов 3-10-^ Мф;
метеоритного и кометного вещества 10-Шф;
планетной системы 448,0 Мф.

Луна [1] имеет следующие характеристики:
среднее расстояние от Земли 384 401(1) км,
минимальное и максимальное удаление от Земли 356 400—406 700 км;
сидерическнн период (относительно неподвижных звезд) 27,322 сут;
синодический период (от новолуния до новолуния) 29,531 сут;
наклонение орбиты к эклиптике 5"8'43", наблюдаются колебания ±9' с периодом 173 сут;
эксцентриситет орбиты 0,0549;
наклонение экватора к эклиптике 1"32,5', к орбите 6МГ;
средний радиус 1738,2 км;
масса 7,350-102=' кг;
средняя плотность 3,341103 кг/м^;

Таблица 45.7. Характеристики анет и их орбит [11

Меркурий	0,387	87,969 сут	7,00	**0,206**	58,7 сут	~0	(2-4-6). 10^^	0,055	0,382	370	П.Об	
	0,723	224,701 сут	3,39	0,007	243 сут	- 2	<3.10^^	0,815	0,949		o -5	
Земля	**1,00**	365,256 сут		0,017	23,9 ч	23,5		**1,00**	**1,00**	9 O	0...G	
Марс	1,52	1,88 года	1,85	0,093	24.6 ч	24,0		0,107	0,533	370	0,14	
Юпитер	5,20	11,9 года	1,C0	0.049	9.92 ч	3,1	1,5-1083	318	11,2	24^0	0,50	
Сатурн	9,54	29,5 года	2,49	0,056	10.7 ч	29	4,7-1031	95,2	9,45	1050	0,76	
Уран	19,2	84,0 лет	0,77	0,047	23,9 ч			14,6	4,10	852	**0,62**	
Нептун	30,1	165 лет	1,77	0,009	17.8 ч			17,2	3,88	1117	O.EO	
Плутон		248 лет	17.2	0,249	6,39 сут	>50		~0,002	~0,24	-300	0,09	

света, отраженного всей поверхностью планеты, к количеству падающего на нее света.



усКОрепт свободного падения поверхности 1,622 м/с2;

скорость освобождения на поверхности 2,38 км/с;

видимая звездная величина в полнолунии —12,73,

альбедо 0,067.

Характертстики спутников планет приведены в табл. 45.10.

Астероиды [3, 15]. Насчитывается около 3000 астероидов с определенными орбитами (табл. 45.11), причем 98% астероидов движутся между орбитами .Марса и Юпитера, образуя пояс астероидов. Параметры их орбит:

большие полуоси 2,2—3.2 а.е.;

Рис. 45.12. Внутреннее строение планет земной группы. В процентах указаны относительные объемы ядер [131

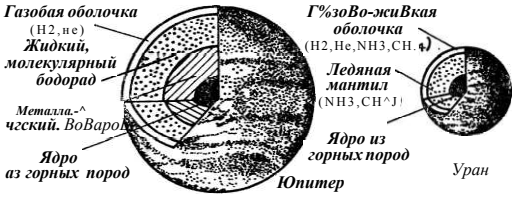


Рис. 45.13. Модели внутреннего строения Юпитера и Урана [13]

Таблица 45.8. Осговиые характеристики атмосфер планет [13] (см. также рис. 45.14)

Характеристика	Земля	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер*
Химический состав (объемное содержание, %)	Or (21); CH4(10-^): Ar (0,93): H, (5-10-^); HrO (0,1—1); Ne(1O-s); CO2 (0,03); He (10-^)		не! cf^lO-5); Ar(0,01); 02(<5-10-«); H2O (0,01—0,1); SO, (10-5); CO (3-10-3); H,S (8-10-3)	Ar(1-2); H f O f - - Or (0,1—0,4)	HC1O0-S); He (12,8): C2Hв{4-10-^); н^о (Ю-^); C2H2(8.10-з); CH4(7-10-2); PH4 (4-10-®); NHs (2-10-==); CO (2-10-')
Средняя молекулярная масса, а. е. м.	28,97	-	43,2	43,5	2,25
Температура у поверхности (в средних широтах), К	Тшах = 310 Тшш = 240	-	735 735	270 200	135
Среднее давление у поверхности, Па	Ю®	<2-10-е	9-10®	6-10^	5-10'
Средняя плотность у поверхности, г/смз	1,27-10-3	<10-1'	61 -10-3	1,2-10-5	***Ю-***

Юпитер ве имеет твердой поверхность. приведены для нижней границы стратосферы.

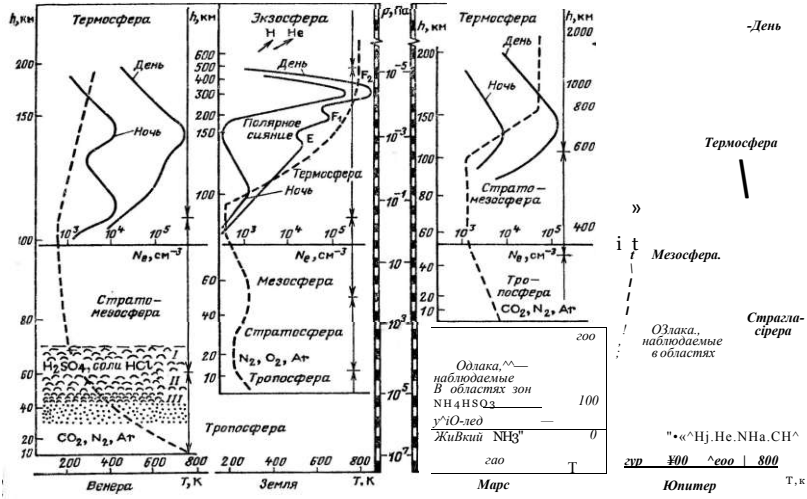


Рис. 45.14. Строение атмосфер Венеры, Земли, Марса, Юпитера. Показаны профили температуры Г (пунктир) и электронной концентрации iVj (сплошные кривые). По вертикали отложены высота над поверхностью планеты *h* и давление *p* [13]

Таблица 45.9. Характеристики колец вокруг планет [13, 14]

П.панста	Внешний радиус, км	Ширина, км	Толщина,	Число
Юпитер	126 ООО	600	1	1
Сатурн	137 000	60 000	1—2	5
Уран	5оОООО	Гхеременная		9

периоды обращения 3—9 лет с пробелами около 4,0; 4,8 и 5,9 лет, т. е. 1/3, 2/5 и 1/2 периода Юпитера;
эксцентриситеты 0—0,2;
наклонение к эклиптике 5—15°.

Кометы [3, 16]. Источником комет в Солнечной системе служит облако Оорта, находящееся на расстоянии 10^—105 а.е. от Солнца. Облако содержит около 10" комегных ядер. Приведем характеристики комет (см, также табл. 45.12):

размеры ядра 0,5—20 км;
размеры головы на расстоянии около 1 а.е. от Солнца 10^—106 км;
длина хвоста на расстоянии около 1 а.е. от Солнца 108—10' км;
расстояние от Солнца, на котором появляется хвост, 4—6 а.е.;
масса 10"—10'« кг.

Межпланетная среда. Параметры солнечного ветра (рис. 45.15) вблизи орбиты Земли [3, 18]:
скорость 400—700 км/с;
температура 5-10^—5-105 К;
магнитная индукция 10-»-10-« Тл (рис. 45.16);
плотность 1—10 см-3;
поток массы 10"—10'® г/с;
поток кинетической энергии 10»" Вт.

Гелиопауза (граница между солнечным ветром и межзвездной средой, рис. 45.17) находится на расстоянии от Солнца около 200 а.е. [19].

Размер зоны ионизованного водорода, окружающей Солнце, [20] в направлении движения Солнца составляет 5,5 а.е., в противоположном направлении — 20 а.е, под прямым углом к скорости движения — 10 а.е. Скорость движения Солнца относительно межзвездной среды 20 км/с в направлении «=252°, 6=—15°.

Межпланетная пыль [3] образует диск в плоскости эклиптики радиусом около 3 а.е., масса пылинок 10-»—10-S г. Полная масса пыли в Солнечной системе 10»^-1020 г. Наклонение орбит пылинок к эклиптике не превосходит 30—40°,

Таблица 45.10. Характеристики спутников и их орбит [11] (в скобках указаны неустоявшиеся названия)

	Спутники	Большая полуось, км	Орбитальный период, сут	Эксцентриситет	Наклонение орбиты к градусу	Масса, $M_\odot$	Радиус, км
			Спутники Марса				
	Фобос	9 380	0,319	0,018	1,0	$1{,}3\cdot10^{-15}$	13 (1)
	Деймос	23 500	**1,26**	**0,002**	2,0	$2{,}7\cdot10^{-8}$	7,5 (1)
			Спутники Юпитера				
	(Адрастея)	128 000	0,297		~0		20
	(Метис)	127 000	0,295	~0	~0	—	20
	Амальтея	181 000	0,489	0,003	0,4	—	135 (1)
	Теба	221 000	0,670	0	0	—	40
	Ио	422 000	1,77	Малый переменный	0,0	1,2	1816
Галилеевы спутники	Европа	671 000	3,55	То же	0,0	0,66	1563
	Ганимед	1 070 000	7,16	0,001*1	0,2	2,0	2638
	Каллисто	1 880 000	16,7	**0,01**	0,2	1,5	2410
	Леда	11 100 000	240	0,146*1	26,7		5
	Гамалия	11 500 000	251	0,158*1	27,6		90
	Лизифоя	11 700 000	**260**	0,130*1	29,0		10
	Элара	11 700 000	**260**	0,207*1	24,8		40
	Ананке	20 700 000	617*2	0,17*1	33		10
	Карма	22 400 000	692*2	0,21*1	16		15
	Пасифея	23 300 000	735*2	0,38*1	35		20
	Синопа	23 700 000	758*2	0,28*1	27	—	15
			Спутники Сатурна				
	(Атлас)	138 000	0,602	0,002	0,3		20(1)
	S27	139 000	0,613	0,004	0,0	—	70(1)
	S26	142 000	0,629	0,004	0,1		55 (1)
	Эпиметеус	151 000	0,694	0,009	0,3		70 1)
	Янус	152 000	0,695	0,007	0,1		**110(1)**
	Мимас	186 000	0,942	0,020	1,5	-0,0005	**196**
	Энцелад	238 000	1,37	0,004	0,0	-0,001	255
	Тефия	295 000	1,89	0,000	1,1	-0,01	530
	Телеста	295 000	1,89	—			17(1)
	Каллипсо	295 000	1,89				17(1)
	Диона	377 000	2,74	0,0022	0,0	0,014	560
	S6 (Диона В)	377 000	2,74	0,005	0,2		18 (1)
	Рея	527 000	4,52	0,001	0,4	0,034	765
	Титан	1 220 000	16,0	0,029	0,3	1.8	2575
	Гиперион	1 480 000	21,3	0,104	0,4		205 (1)
	Япет	3 560 000	79,3	0,028	14,7*1	0,026	730
	Феба	13 000000	550*2	0,163	30		ПО
			Сгутники Урана				
	Миранда	130 000	1,41	0,000	~0	0,0005	160
	Ариель	192 000	2,52	0,003	~0	0,03	705
	Умбриэль	267 000	4,14	0,004	- 0	0,01	580
	Титания	438 000	8,71	0,002		0,04	845
	Оберон	586000	13,5	0,001		0,04	760
			Спутники Нептуна				
	Тритон	355 000	5,88*2	0,000	20	0,8	1600
	Нереида	5 560 000	360	0,75	28	2-10-8	470
			Спутник Плутона				
	(Харон)	- 17 000	6,39	~0	-	- 0,02	400

Таблица45.10.Характеристикиспутниковиихорбит[11](вскобкахуказанынеустоявшиесяназвания)

Название	Радиус,	Масса, кг	Период вращения	период, сух	Большая полуось орбиты, а. е.	Эксцевтриситет	орбиты к эклиптике. l-рад
Церера	500	1,2-1021	9 Ч 05 МИН	1681	2,766	0,079	10,6
Па-члада	304	2,3-1019	10 ч	1684	2,768	0,235	34,8
Юнона	123		7 ч 13 мнн	1594	2,668	0,256	13,0
Веста	269	2,4-10»	5 ч 20 мин	1325	2,362	0,088	7.1
Геба	100		7 ч 17 мин	1380	2,426	0,203	14,8
Ирис	104	—	7 ч 07 мин	1344	2,386	0,230	5,5
Гигия	225	—	18 ч	2042	3,151	0,099	3,8
Евномия	136	—	6 ч 05 мин	1569	2,643	0,185	11,7
Психея	125	—	4 ч 18 мнн	1826	2,923	0,135	3,1
Икар	0,7		2 ч 16 мин	408	1,078	0,827	23,0

Таблица 45.12. Характеристики некоторых короткопериодических комет [I, 16]

Комета	Прохождение перигелия		Период,	Наклонение орбиты к эклиптике, град	Эксцентриситет	Перигслийное расстояние.	Болькая полуось, а, е.
	последнее, год	число возвращений					
Гачлея	1986	30	76,1	162	0,97	0,59	17,8
Энке	1977	51	3,31	12	0,85	0,34	2,21
Темпел я-2	1978	16	5,26	12	0,55	1,37	3,0
Ольберса	1956	3	69	45	0,93	1,20	16,8
Кроммелина	1956	6	27.9	29	0,92	0,74	9,2
Пенса — Брукса	1954	3	71	74	0,96	0,78	17,2

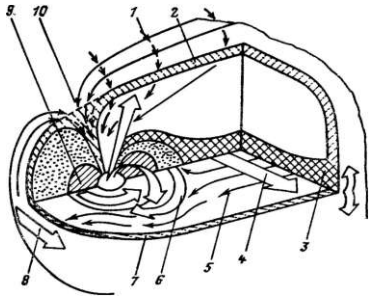


Рис. 45.15. Обтекание магнитосферы Земли солнечным ветром [17]:

гнитвое поле; 2 — плазменная плазменный слой; 4 —ток поперек хвоста; 5 — конвекция плазмы; 6 — кольцевой ток; 7 ~ магпТ1Т0пауза: 4 — ток на магнию-паузе; S — плазмосфера (вращается вместе с Землей); *10-каса*

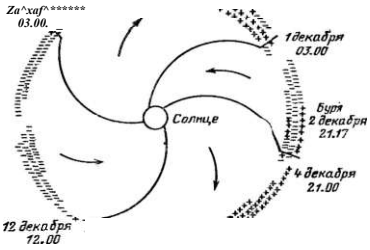


Рис. 45.16. Секторная структура межпланетного магнитного поля в плоскости эклиптики:

е, направленное

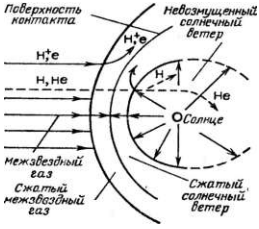


Рис. 45.17 Взаимодействие между солнечным ветром и межзвездной средой:
сплошные линии — траектории протонов и электронов межзвездного газа, пунктир — траектории нейтральных атомов, жирные линии — внешняя и внутренняя ударные волны [19]

45.4. ЗВЕЗДЫ

Основные типы спектральных классов приведены в табл. 45.13

Та£

звезд [1-3]

Спектральный	Характеристики	Поверхностная температура, К	Цв^^вездь,
	Горячие звезды с линиями поглощения Не II	30 000-50 000	Голубой (-0,3'")
	Линии поглощения Не I (линии Н усиливаются к классу А)	12 000-30 000	
	Линии И достигают наибольшей интенсивности и затем ослабевают; усиливаются линии Са1I	7600-11000	Белый (0,2—0,0^m)
	Линии Са 11		
	ют; развиваются линии металлов		
	Сильные линии Са1l и других металлов; линии Н ослабевают	5000-6000	Желтый (0,8-0.6'")
	Сильные линии металлов; появляются полосы поглощения СН и CN		Оранжевый (1,4-0,8'")
	Сильные полосы TiO		Красный (2,0-1.4'")

Каждый спектральный класс делится на 10 подклассов, обозначаемых цифрами от О до 9 (в сторону уменьшения температуры), которые ставятся после буквы. После обозначения спектрального класса римской цифрой указывается класс светимости звезды: I — сверхгиганты, II — яркие гиганты, III — гиганты, IV— субгиганты, V — главная последовательность, VI — субкарлики, VII — белые карлики (табл. 45.14, 45.15).

Кроме перечисленных выделяют дополнительные спектральные классы:

S — звезды, отличающиеся наличием в спектре полос поглощения ZrO, по физическим характеристикам соответствуют классу К;

N и R — звезды, отличающиеся наличием в спектре полос поглощения молекулярных соединений углерода, окиси углерода и циана; соответствуют соответственно основным спектральным классам К и G;

Таблица 45.14. Характеристики звезд различных спектральных классов [2]

	I i i 5 P J	I L	y	i £	
Скорпиона А (Антарес)	MOI	3300	34 000	530	19
(Арктур)	K2III	4000	130	26	4,2
Ориона	BIV	23 000	13 000	7,2	13,7
Большого Пса А (Сириус А)	A1V	9700	61	2,4	3,3
Звезда Барнарда	M5V	3000	0.015	0,50	
Большого Пса В (Сириус В)	A5VII	8200	2,6-10-3	2,6-10-2	0,96

Таблица 45.15. Характеристики некоторых ярких звезд [1]

Звезда	Видимая визуальная звездная величина	Абсолютная визуальная звездная величина	Спектральный класс и класс светимости	Расстояние, пк
Полярная (а Малой Медведицы)	2,3*	- 4 , 6	F8I	240
Ахернар (а Эридана)	0,48	- 2 , 2	B 5 I V - V	39
Алголь (р Персея)	2,2*	- 0 , 3	B8V	32
Альдебаран (а Тельца)	0,85	- 0 , 7	K 5 I I 1	2!
Капелла (а Возничего)	0,08	- 0 , 6	G 8 + F	!4
Ригель (р Ориона)	0,11	- 7 , 0	B8I	250
Бетельгейзе (а Ориона)	0.8*	—6	M21	200
Канопус (а Киля)	- 0 , 7 3	- 4 , 7	FOI	60
Сириус (а Большого Пса)	- 1 , 4 5	1,41	AIV	2,7
Процион {а Малого Пса)	0.35	2,65	F51V	3,5
Спика (а Девы)	0,96	- 3 , 4	BIV	80
а Центавра	- 0 , 1	4,3	G2V	1,33
Арктур (а Волопаса)	- 0 , 0 6 *	—0,2	K2pIII	И
Антарес (**а** Скорпиона)	1,0	- 4 , 7	M i1	130
Вега (**а** Лиры)	0,04	0,5	AOV	8,1
Альтаир (а Орла)	0,77	2,3	A7V	5,0

Переменная ^везда.

Q — новые звезды;
W — звезды Вольфа — Райе — горячие звезды с широкими эмиссионными линиями.

Диаграмма Герцшпрунга — Рессела [21] (рис. 45.18) связывает светимости и спектральные классы звезд. Каждому типу звезд на диаграмме соответствует своя зона. Наиболее многочисленный тип звезд принадлежит *главной последовательности.* Это звезды, источником энергии которых служат термоядерные реакции Н—>-Не. Минимальная масса, необходимая для того, чтобы в недрах звезды начались термоядерные реакции, равна 0,085 Мо[22]. В звездах массой Л1<Л1© основной реакцией является рр-цикл (см. гл. 39). В условиях звездных недр скорость энерговыделения, Вт/кг, при рр-реакции равна

$$2{,}50\ pX^2 = 772/3\ \exp(-33{,}8\,Te\text{-}1/3),$$

где р — плотность, г/см; *X* — массовая *жоля* водорода; Те — температура вещества, 10® К. В звездах массой М>Мо основным источником энергии служит двойной CNO-цикл (см. гл. 39), для которого скорость энерговыделения

$$\text{^CNO} = 9\ .\ 5\ .\ p\ X\text{^CN}\ \Gamma\text{^'^'}\exp(-\ 152{,}3\ T\text{^"^}),$$

где ^ск — массовая доля углерода и азота.

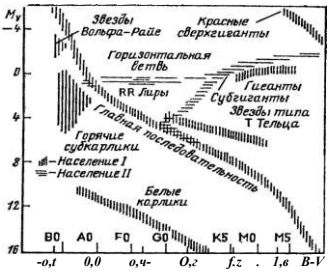


Рис. 45.18. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела [2]

После выгорания водорода в ядре начинается горение водорода в окружающем ядро слое, а затем последовательное горение гелия, углерода и других элементов. На этих стадиях происходит увеличение размеров и светимости звезды, в результате чего она перемещается по диаграмме Герцшпрунга — Рессела вправо и вверх. В области *красных гигантов* находятся звезды со слоевым источником энергии. На *горизонтальную ветвь* попадают звезды умеренных масс (около М©), в ядре которых горит гелий На поздних стадиях эволюции звезды интенсивно теряют массу. После истощения всех источников термоядерной энергии звездный остаток в зависимости от его массы превращается в белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру.

Характеристики звезд различных типов приведены в табл. 45.16 и на рис. 45.19, 45.20.

Двойные и кратные звезды. На 100 звездных систем приходится 30 одиночных звезд, 47 двойных систем (94 компонента) и 23 кратные системы (81 компонент) [1].

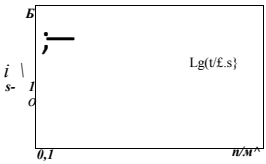


Рис. 45.19. Зависимость светимости *L* и раднуса звезды главной последовательности от ее массы. Здесь же приведено время *t,* 10' лет, пребывания звезды на главной последовательности [1]

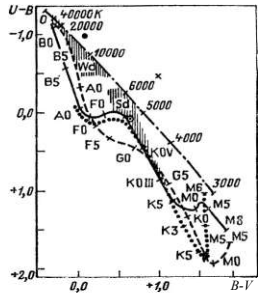


Рис. 45.20. Связь между показателями цвета U—В к *B—V* для звезд главной последовательности (сплошная линия), сверхгигантов (пунктир), гигантов (точки). Заштрихованы области, занимаемые белыми карликами (Wd) и субкарликами (Sd). Штрихпунктирная линия соответствует излучению черного тела. Показано положение Солнца (©), квазара 3С273 (ф), рентгеновского источника Лебедь X-1 (X) [3]

Переменные звезды. Кроме *затменных переменных* звезд, которые представляют собой двойные системы, изменяющие свой блеск вследствие периодических затмений одного компонента другим, имеются различные типы физических переменных звезд. Среди них наиболее многочисленны *пульсирующие звезды* (табл. 45.17).

Для классических цефенд существует соотношение период — светимость Г2]:

$$My = -1{,}67 - 2{,}54\ \lg P,\quad Мд = -1{,}33 - 2{,}25\ \lg P,$$

где ***Mv K MB*** — абсолютные звездные величины соответственно в визуальной и голубой областях спектра; *P* — период, сут. Эта зависимость используется для определения расстояний до близких галактик.

Катаклизмические переменные [24, 25] (табл. 45.18) представляют собой тесные двойные системы (орбитальный период 1—10 ч), одним из компонентов кото-

45.16. Масса, радиус, светимость и средняя плотность в зависимости от спектрального класса звезды [1] (СГ - сверхгигант, Г — гигант, ГП — главная последовательность)

	(M/MQ)			Is («/«©)			ig (L/io)			Igp ,г/см»]		
	сг	Г	ГП	сг	Г	ГП	сг	Г	ГП	СГ	г	ГП
05	+2.2	—	+ 1,6			+ 1,25			+5,7			-2,0
ВО	+1.7	—	+1,25	+ 1,3	+ 1,2	+0,87	4-5,4	—	+4,3	-2,1	—	-1,2
В5	+1,4	—	+0,81	-^1,5	+ 1,0	-i-0,58	+4,8	—	+2,9	-2,9	—	-0,78
АО	Ы,2	—	+0,51	-7-1.6	+-0,8	+0,40	+4.3	—	+ 1,2	—3,5	—	-0,55
А5	+1,1	—	+0,32	+ 1,7	—	+0,24	+4,0	—	+1,3	-3,8	—	-0,26
F0	+1.1	—	+0,23	+ 1,8	—	+0,13	+3,9	—	+0,8	-4,2	—	-0,01
F5	+ 1,0		+0,11	+ 1,9	+0,6	+0,08	+3,8		+0,4	—4.5		-0,03
GO	+1,0	+0,4	+0,04	+2,0	+0,8	+0,02	+3,8	+ 1,5	+0,1	-4.9	-1,8	f0,13
G5	+ 1,1	+0,5	-0,03	+2,1	+ 1,0	—0,03	+3,8	+ 1,7	-0,1	-5,2	-2,4	+0,20
КО	+ 1,1	+0,6	—0,11	+2,3	+ 1,2	—0,07	+3,9	+ 1,9	-0,4	—5,7	—2,9	+0,25
К5	+ 1,2	+0,7	—0,16	+2,6	+ 1,4	—0,13	+4.2	+2.3	-0.8	—6,4	—3,4	f0,38
МО	+1,2	+0,8	—0,33	1-2,7		—0,20	+4,5	+2,6	— 1.2	—6,7	—4	+0.4
М2	+1,3		—0,41	+2,9		—0,3	+4.7	+2,8	-1,5	—7,2		+0,7
М5		—	—0,67	—	—	-0,5		+3,0	—2,1	—	—	-Ы.О
М8	—	—	—1.0	—	—	-0,9	—	—	—3,1	—	—	+ 1,8

Таблица 45.17. Пульсирующие переменные [23]

Тип звезды	Период	Характерный период	Население	Спектральный класс	'Абсолютная звезд-
RR Лиры	1,5-24 ч	0,5 сут	11	А2- F2	0,0—1.0'"
Классические цефеиды	1-50 сут	5-10 сут	I	F6 - К2	-0,5-^—6'"
W Девы	2-45 сут	12-20 сут	II	F2 - G6 (?)	0-^—3"»
RV Тельца	20-150 сут	75 сут	II	G, К	-3™
Красные полуправильные переменные	100-200 сут	100 сут	I и II	(К), М, R, N, S	— 14—3'"
Долгопериодические переменные Типа р Цефея Большого Пса)	100—700 сут	270 сут	I и II	Me, Re. Ne, Se	i-I-^—2*"
Карликовые цефеиды и переменные типа 8 Щита	4—6 ч	5 ч	I	B1 - B 2	-3,5-;—4.5'"
Цефеиды с биениями (двупериодические цефеиды)	1—3 ч	2 ч	I	А2 ~ F 5	+2--+3'"
Переменные белые карлики (звезды типа ZZ Кита)	1_7 сут	2 сут	I (?)	FO — GO (?)	—1-^-3'" (?)
	200—1000 с	500 с (?)	к?)	А5 - F 5 (?)	**+10-+15'" (?)**

Таблица 45.18. Типы катаклизмических переменных

Тип	Амплитуда изменения звездной величины при вспышке	Светимость в максимуме, Бт	Полная энергия вспышки. Дж	Длительность сут	Время между
Классические новые	7_9Ш	10"	1038_103Д	50—5000	~10з лет
Повторные новые		10^'		10—100	10—100 лет
Карликовые новые:					
типа и Близнецов	2-6'"	10'-'	1031 — 1043	10	15—500 сут
типа Z Жирафа	2-5'"	1028	1031_1033	10	10-50 сут

Таблица45.10.Характеристикиспутниковиихорбит[11](вскобкахуказаныненустоявшиесяна

Звезда	вс™шкн	Звездная величина			Абсолютная звездная ве-	сут	Орбитальный период [26]
		до вспышки	в максимуме	вспышки	максимуме		
Т Возничего	1891	>13	4,0	14,8	-6.2	120	4 ч 20 мин
(Ж Персея	1901	13,5	0,2	13,2	-8,3	12	45 ч 20 мин
V 603 Орла	1918	10,6	—1.1	10,9	—8,4	7	3 ч 20 мин
DQ Геркулеса	1934	14,3	1,4	13,8	—6,2	105	4 ч 39 мин

• — время уменьшения блеска после максимума на 3

Таблица 45.20. Некоторые повторные новые звезды [1]

Звезда		Звездная величина				Р
Т Северной Короны	1866, 1946	2,1	10,6	-8.1	6	230 сут
RS Змееноса	1898, 1933, 1958	4.3	11,6	-8,5	10	
WZ Стрелы	1913, 1946	7.3	15,9	—7.1	33	81,5 мин
и Скорпиона	1906, 1906, 1936	8,9	17,6	—7,6	6	

рых является белый карлик, а другим — нормальная звезда. В результате неустойчивости, развивающейся при аккреции (перетекании вещества с нормальной звезды на белый карлик), происходят вспышки оптического излучения. В случае классических новых звезд это тепловая неустойчивость, которая приводит к термоядерному взрыву водорода, накопившегося в результате аккреции на поверхности белого карлика. Катаклизмические переменные представляют собой рентгеновские источники (светимость Ю® * — В т в спокойном состоянии).

Характеристики некоторых катаклизмических переменных приведены в табл. 45.19, 45.20.

К другим типам переменных звезд относятся следующие звезды.

Звезды типа Т ***Тельца*** {27, 28] — звезды массой 0,5—3 М0, еще не вышедшие на стадию главной последовательности. Они испытывают нерегулярные колебания блеска амплитудой до нескольких звездных величии. Относятся к спектральным классам от Af до G с сильными эмиссионными линиями. Светимости составляют 0,3—30 Lq. Скорость потери массы 10-^— 1О-Ш0/год.

Звезды типа UV ***Кита*** [1, 29] — вспыхивающие карликовые звезды спектрального класса М массой 0,1—0,5 М©. Вспышки происходят нерегулярно с характерной частотой около 1 сут-'. Время нарастания блеска — примерно 1 мин, длительность вспышки — около 20 мин, полная энергия вспышки — порядка 10^ Дж.

Таблица 45.21. Характеристики некоторых радиопульсаров [36]

Пульсар	Период Р. с	Время замедления P/P, 10« лет	Эквивалентная ширина импульса на частоте 400 МГц*, мс	Плотность частоте 400 МГц. Яв	1 S к	I I § I с е	Скорость потери энергии*г, 102SBT	Примечание
PSR 1937+24 [35]	1,5578-10-3	150	0,125*3		2,5		40	
PSR 0531+21 (пульсар в Крабовидной туманности)	0,0332	0,0024	1.9	480	2,0	56,7	4600	Наблюдается пульсирующее излучение в оптическом, рентгеновском и 7-диапазонах
PSR 1913+16	0,0590	212	10	12	6,1	167	2-10-2	Входит в состав тесной двойной системы, PoVC = = 27906,98 с
PSR 0833-45 (пульсар в созвездии Паруса)	0,0892	0,022	1.7	5000	0,5	69,0	67	Наблюдается пульсирующее излучение в оптическом и f-диапазонах
PSR 1952+29	0,4266	8600	13	20	0,8	20	5-10-е	
PSR 1919+21	1,3373	32	25	56	0,5	12,4	2-10-^	—
PSR 1845-19	4,3081	5,8	66	15	0,7	19,1	10-^	—

нмпульса, отнесенная к максимальной плотности потока.

Скорость потери энергии ения /22, рассчитанная для характерного нейтронной звезды *I* =

Ширина импульса полувысоте.

Звезды типа R ***Северной Короны*** [1] — сверхгиганты спектральных классов F—K и R, испытывающие непериодические уменьшения блеска иа 1—9"" продолжительностью десятки и сотни дней.

Симбиотические звезды [ЗО] — тесные двойные системы, состоящие из холодной и горячей звезд. Хаотически изменяют свой блеск на I—3"" за время порядка года (иногда — десятков лет).

Пекулярные звезды [3]. Перечислим некоторые из них.

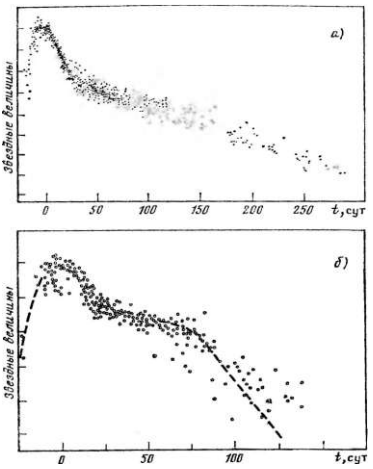
Звезды Вольфа — Райе — звезды высокой светимости (порядка 10® /.©) с очень яркими и широкими эмиссионными линиями, отличаются присутствием в спектрах одновременно линий высокоионизованных ионов (Г«10® К) и сравнительно низкотемпературного континуума [7'!к(1-н2) • 10^ К]. Представляют собой массивные (около 10 Л}0) звезды на конечных стадиях эволюции, интенсивно теряющие массу (Ю-»—Ю"® М© в год) в виде мощного звездного ветра. Известно около 300 таких объектов в нашей и соседних галактиках.

Магнитные звезды обладают очень высокими (10-·—1 Тл) магнитными полями. Все звезды этого типа отличаются аномальным химическим составом (по-видимому, только во внешних областях): занижено содержание гелия, тогда как содержание тяжелых элементов (Si, Cr, Mn, Sr, Eu, Gd и других) аномально велико. Избыток в среднем растет с увеличением атомного номера элемента, достигая 10^—10® для редкоземельных элементов. Магнитные звезды лежат на главной последовательности в интервале спектральных классов B—F. К ним принадлежит 10—15% звезд этой части диаграммы.

Сверхновые звезды [31]. Вспышка сверхновой происходит в результате коллапса звезды, в которой истощились запасы ядерного топлива. При этом выделяется энергия порядка 10^" Дж и значительная часть массы звезды выбрасывается в виде оболочки, расширяющейся со скоростью 10 000—20 000 км/с. Светимость в максимуме 1086_-1037 ВТ (рис. 45.21). Частота вспышек сверхновых в Галактике составляет примерно 0,05 год-'.

Конечные стадии эволюции звезд [33]. Конечное состояние звезды после истощения ядерного топлива и сброса массы в ходе эволюции либо при вспышке сверхновой зависит от массы коллапсирующего остатка. ***Белые карлики*** представляют собой звезды, в которых сила тяжести уравновешивается давлением вырожденного электронного газа. Их излучение обеспечивается тепловой энергией, запасенной в их недрах. Масса белого карлика не может превысить значение (предел Чандрасекара) ЛГ=1,46 (2/(х)2 М©, где М.=A/Z — молекулярная масса на электрон (для элементов в интервале Не—Fe }д=52). Радиусы белых карликов составляют 10®—10' м (рис. 45.22), светимости — (10-2—10-<) L0, центральные плотности — порядка 10® кг/м^. Зеемановское расщепление линий свидетельствует о наличии у ряда белых карликов магнитных полей с B = 102-M0з Тл.

В интервале масс 0,1 Л10<М<(2-^3) М © равновесным состоянием является нейтроиная звезда (рис. 45.23), Характерные параметры нейтронных звезд: радиус — около 10 км, ***B*** — до 10®~10® Тл, гравитацин-



Сводные кривые блеска сверхновых I ***(a)*** и II (б) типов [32]

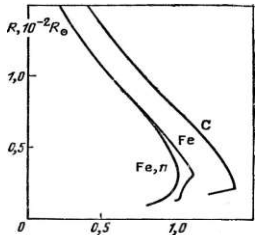
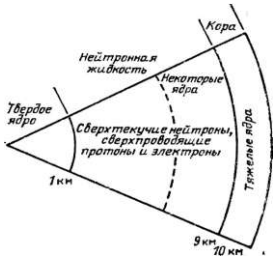


Рис. 45.22. Зависимость радиуса белого карлика от его массы. Приведены результаты расчетов для белых карликов, состоящих из углерода, железа и железа с учетом нейтронизации [34]



Примерная схема строения нейтронной звезды [35]

онное красное смещение на поверхности плотность в центре 10"—10'® кг/м^ момент инерции — порядка 10® кг-м^. Верхняя граница массы нейтронных звезд определяется неизвестным уравнением состояния вещества при сверхвысоких плотностях, но она заведомо не превосходит 3,2 М©. Звездные остатки большей массы неизбежно коллапсируют в ***черные дыры.***

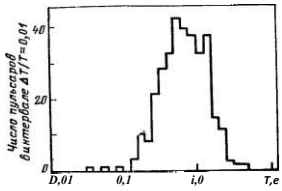


Рис. 45.24. Распределение периодов радиопульсаров f36]

Вращающиеся нейтронные звезды с сверхсильными магнитными полями могут проявлять себя как ***радиопульсары*** [35, 36] — мощные источники строго периодических импульсов радиоизлучения, период которых совпадает с периодом вращения нейтронной звезды (табл. 45.21). Радиоизлучение имеет степенной спектр (рис. 45.24). Источником энергии пульсара является энергия вращения нейтронной звезды, поэтому периоды всех пульсаров увеличиваются. Известно свыше 400 пульсаров.

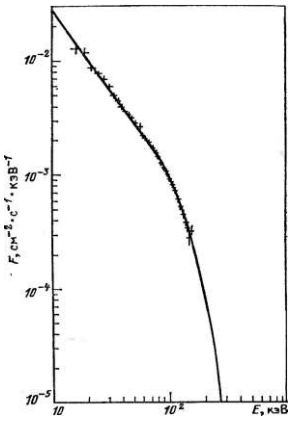


Рис. 45.25. Спектр рентгеновского излучения кандидата в черные дыры источника Лебедь Х-1:
сплошная кривая — спектр излучения слоя плазмы с температурой *Т~27* кэВ и оптической полутолщиной му рассеянию т-2 [42]

Компактные звезды, входящие в состав тесных двойных систем, могут проявлять себя как ***рентгеновские источники*** [33]. Источником энергии служит аккреция вещества, перетекающего с нормальной звезды на компактную. Светимость аккрецирующих источников L. Вт, связана со скоростью аккреции ***т,*** 10-® Л1©/год, соотношением

/L = 6-10»€m.

Для белых карликов 10-<, для нейтроиных звезд 1=0,1—0,2, для черных дыр при дисковой аккреции

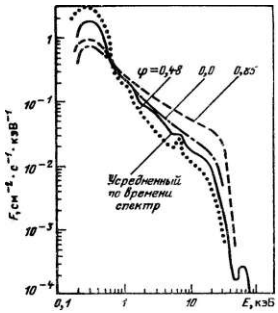


Рис. 45.26. Спектр излучения рентгеновского пульсара Геркулес Х-1 в различных фазах Ф периода пульсаций. Спектральная особенность вблизи *Е=7* кэБ—результат флуоресценции железа. Особенность вблизи £=50 кэБ соответствует циклотронной частоте электронов в магнитном поле с 6=5-108 Тл [43]

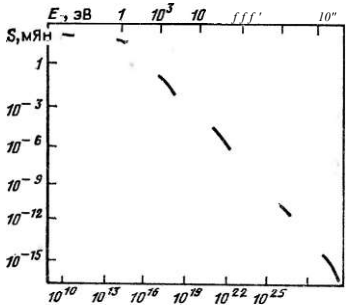


Рис. 45.27. Спектр излучения Лебедь Х~3. Источник проявляет активность во всех диапазонах электромагнитных волн от радио- до уизлучения сверхвысоких энергий. Входит в состав тесной двойной системы (орбитальный период 4,8 ч), находящейся на расстоянии 10 кПК [45]

Таблица 45. 22. Рентгеновские источники — кандидаты в черные дыры

Источник	I I I	I	| |	1	« 1	время
Лебедь Х-I [38]	4 - 6	8 - 1 1	0 9 , 7 I	5.6	2,5	
LMCX-1 [39]	20	> 3	0 7	3,9	50	
LMCX-3 [39]	20	7—14	**В3**	1.7	50	

Таблица 45. 23. Характеристики некоторых рентгеновских пульсаров (40, 41)

Источник	fi IL	1 о i	ill *ш*	1	g 1 1
SMC X-1	50	0,71	-6-10-1	3.89	50
Геркулес Х-1	2,5	1,24	-3- 10-е	1^7	5
Центавр Х-3	8 - 1 6	4,84	-3-10-4	2,087	8
Х Персея	4-10-^	835	—2-10-1	-4 0	0.35
Парус Х-1	0,8-0,25	283	-2-10-^	8,97	1.4

1=0,06-4-0,4 (в зависимости от момента вращения черной дыры). Полной классификации рентгеновских источников нет. Выделяют отдельные типы источников.

При аккреции на нейтронную звезду с В>10® Тл вещество падает в район магнитных полюсов. Рентгеновское излучение нейтронной звезды модулируется ее вращением вокруг оси. Такие источники называют *рентгеновскими пульсарами.* Известно 20 рентгеновских пульсаров с периодами 0,1—1000 с.

Барстеры — рентгеновские источники, в которых на фоне стационарного рентгеновского излучения со светимостью порядка Ю^® Вт непериодическн с интервалом от нескольких часов до суток происходят всплески излучения. Время нарастания всплеска — около 1 с, время затухания — от 3 до 100 с, светимость в максимуме — порядка Ю^і Вт. Известно около 30 таких источников. Всплески происходят в результате термоядерных взрывов вещества, накопившегося при аккреции на поверхности нейтронной звезды.

Транзиентные (новоподобные) источники — системы, в которых аккреция происходит не постоянно; в результате источник то появляется, то исчезает с интервалом от нескольких месяцев до нескольких лет Это может быть связано с эллиптичностью орбиты релятивистской звезды в двойной системе или с пульсациями нормальной звезды, что приводит к сильным колебаниям скорости аккреции. Среди транзиентных источников есть рентгеновские пульсары и барстеры.

В табл. 45.22, 45.23 приведены параметры некоторых рентгеновских источников, а на рис. 45.25—45.27— характерные спектры.

Космические \-всплески характеризуются следующими параметрами [44] (см также рис. 45.28):

энергия, регистрируемая за весь всплеск. 3-10-»— 1,5-10-^ Дж/м2;

плотность потока энергии в максимуме 5-10-8— 4-10-' Дж/(м^-с);

длительность всплесков 0,1—100 с;

число отдельных пиков во всплеске 1—5, иногда

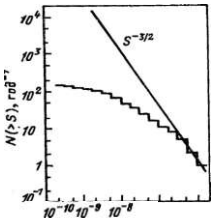


Рис. 45.28. Распределение частоты ***N*** появления •у-всплесков, интенсивность которых превосходит S: жирная прямая соответствует закону N к о т о р ы й наблюдался бы, если бы источники всплесков были распределены в пространстве однородно и изотропно [44]

45.5. НАША ГАЛАКТИКА

Параметры Галактики [1, 3, 46, 47]. Наша Галактика представляет собой светящийся диск из звезд. Принадлежит к классу спиральных. В центре диска имеется утолщение — балдж, внутри которого находится компактное ядро Галактики. В диске выделяют плоскую составляющую — тонкий слой межзвездного газа и образующихся из него молодых звезд. Диск окружен сфероидальным гало из слабосветящихся старых звезд. Из динамических соображений [анализ кривой вращения (рис. 45.29) и устойчивости] следует, что Галактика должна быть окружена короной, содержащей основную часть массы системы. Непосредственно корона не наблюдается, поэтому она должна состоять из темной материи [маломассивные звезды низкой светимости, «мертвые» звездные остатки, нейтрино с ненулевой массой покоя (?)].

Ниже приведены параметры Галактики (см. также рис. 45.30—45.36, табл. 45.24):

полная светимость б-Ю^в Вт;

величина которых меньше 16,5^, (6—8) • 10'°;

количество звезд, абсолютная визуальная звездная

период обращения Солнца вокруг ядра Галактика 2,5-1 ОЗ лет;

возраст — примерно 10'° лет:

плотность энергии в диске Галактики;

излучения звезд 0,7-10-'з Вт/м^;

турбулентных движений газа 0,5-10-« Дж/м^;

реликтового излучения 0,4-10-Дж/м^;

космических лучей 1,6-10-*® Дж/м®;

магнитного поля примерно 10-'® Дж/м®;

суммарная плотность вещества в центральной плоскости Галактики в окрестностях Солнца, определяемая по теореме вириала [48], 0,14 М© /пк®=8,8Х X10-2' jjp/^S;

плотность наблюдаемой звездной материн в окрестностях Солнца 0.046 Л1©упкЗ=3,0-10-^» кг/м^;

плотность межзвездного газа в окрестностях Солнца 0,03 Мо/пкЗ= 1,2-10-2» кг/м^

Типы звездных населений [1, 3]. Звезды и другие объекты в Галактике делятся на два типа. К населению I относятся объекты, образующие плоскую подсистему

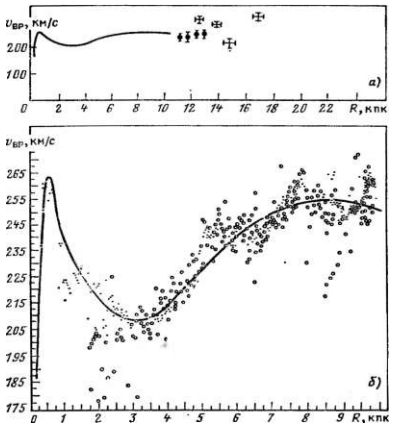


Рис. 45.29. Кривая вращения Галактики [46] (а) (б — более детальный масштаб)

Галактики: звезды в диске Галактики, межзвездный газ и пыль, диффузные туманности, рассеянные скопления. Возраст объектов населения I не превышает 10 млрд. лет. Население II составляют старые звезды (возраст около 10 млрд. лет), имеющие сферическое пространственное распределение и характеризующиеся низким содержанием металлов и высокими пространственными скоростями. К населению II относятся шаровые скопления.

Звездные скопления [1, 3, 50, 51] Полное число скоплений в Галактике — около 20 000.

Таблица 45.24. Размеры $a_{\odot}$, масса M и сплюснутость Е (отношение полуосей) подсистем Галактики

Подсистема			М, 10» ы ^
Ядро	0,6	0,005	0,009
Балдж	0,6	0,21	0,442
Диск*	0,1	4,62	7,68
	0,45	1,026	—0,379
Плоская*	0,02	6,4	1,0
	0.025	5,12	—0,64
Гало	0,3	1,9	1,2
Корона		75	110

* в плоской подсистеме и диске наблюдается понижение плотности и центральной части, поэтому для описания этих систем вводится дополнительная «-отрицательная» масса.

Звездные ассоциации — группы из нескольких десятков или сотен молодых звезд. Имеют размер десятки парсек. Связаны с областями звездообразования. Выделяют О-ассоцнацин, в которых группируются горячие звезды спектральных классов О и В, и Т-ассоциацин, включающие переменные звезды типа Т Тельца. Известно около 70 0-ассоциаций и 25 Т-ассоциаций.

Рассеянные звездные скопления (табл. 45.25) представляют собой группы из нескольких сотен или тысяч звезд. Их массы примерно равны 10^ Мэ, размеры 1—10 **пк** Эти скопления принадлежат **к** населению I. Известно примерно 1000 рассеянных скоплений. Звездные ассоциации и рассеянные скопления имеют содер-

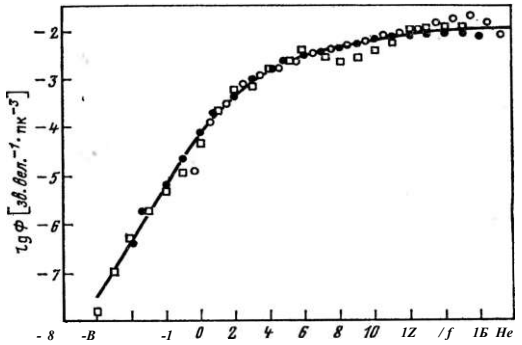


Рис. 45.30. Функция светимости звезд в Галактике Ф(Л1в) (распределение звезд по абсолютным звезцным величинам в полосе В [49]

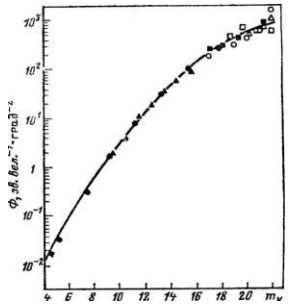


Рис. 45.31. Распределение звезд по визуальным звездным величинам в направлении на полюс Галактики [49]



Рис. 45.32. Распространенность химических элементов: Л —массовое число; указаны ядерные процессы в звездах, с которыми могут быть связаны особенности кривой распространенности [2]

жание тяжелых элементов, близкое к солнечному, и концентрируются к плоскости Галактики.

Шаровые скопления (табл. 45.26) представляют собой устойчивые образования, состоящие из 10^—10' звезд. Общее число шаровых скоплений в Галактике — около 500. Их возраст 10—18 млрд. лет, а содержание тяжелых элементов в 10—100 раз меньше, чем на Солнце. Шаровые скопления образуют сфероидальную систему и концентрируются к центру Галактики.

Межзвездный газ [52, 53]. Внутри иего выделяют следующие области (см. также табл. 45.27): 1) гигантские молекулярные облака (их насчитывается около 4000), в которых содержится почти половина массы все-

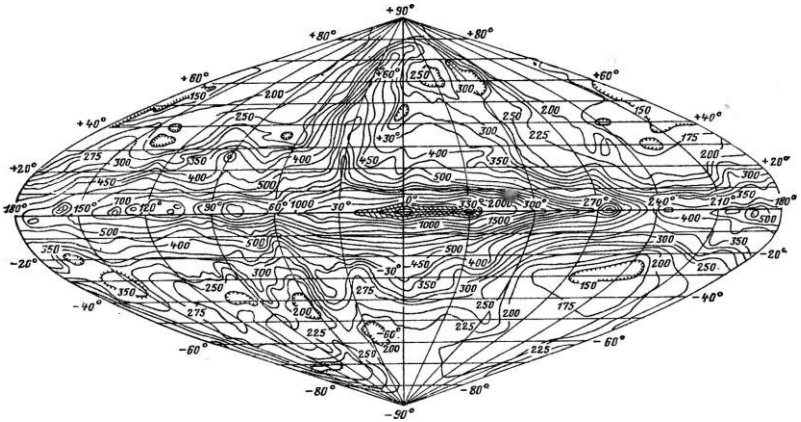


Рис. 45.33. Распределение яркости по небу на частоте 150 МГц в галактических координатахз цифры у изофот — яркостная температура излучения, К [54]

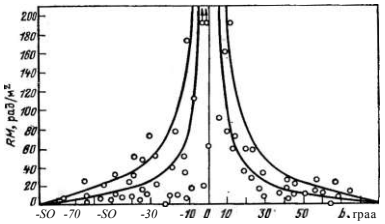


Рис. 45.34. Зависимость меры вращения RIA внегалактических радиоисточинков от галактической широты. Фарадеевское вращение плоскости поляризации радиоизлучения^ позволяет определить величину

ЛМ=0,81 |' В|| Л'е d/ рад/м2 где В || — составляющая магнитной индукции вдоль луча зрения, 10"-'° Тл; Ые — плотность электроиов, см-3; I — расстояние до источника, ПК [54]

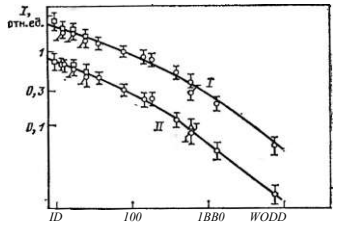


Рис. 45.35. Спектр радиоизлучения Галактики:
1 — излучение высокоширотных областей в направлении ив антицентр; *11* — излучение спиральных рукавов [541

го газа; 2) области нейтрального водорода (HI); 3) зоны ионизованного водорода (НИ), которыми являются эмиссионные туманности вокруг горячих звезд; 4) коридоры горячего разреженного газа (коронального газа). В среднем по диску Галактики плотность межзвездного газа составляет 0,5—0,7 см-з. Толщина газового слоя 200—300 ПК. К периферии Галактики (за пределами 12—15 кпк) она увеличивается и достигает нескольких килопарсек. Средняя концентрация электронов — примерно 0,03 см-з. Основная часть газа сосредоточена в спиральных рукавах. Значительная его часть находится в молекулярном состоянии (табл. 45.28). Полная масса газа в Галактике составляет ;(5-;-10)-108 Ж©. Масса нейтрального водорода, определяемая по излучению в линии с Х=21 см, составляет (2-f-4)-10s Л10. Облака межзвездного газа помимо упорядоченного вращения вокруг центра Галактики движутся хаотически со скоростями около 10 км/с. Облака распределены по массам по закону: число облаков ***dN,*** масса которых лежит в интервале от ***M*** до ***M+dM,*** равно ***dNoc. M'^/ЫМ.*** Межзвездное магнитное поле характеризуется индукцией (2-^7)-Ю-'" Тл.

Таблица 45.25. Характеристики некоторых рассеянных скоплений

Скопление	ё м	ifr ig	V ss	1 t <2g	II	2 1 П
Плеяды	134	2,6	2.2	2,6	8,1	0.5
Гиады	46	2,2	1,8	3,2	8,0	5
Ясли	174	2,5	2,0	2,8	6,9	5
М67	830	3,0	2,7	1,8	12,6	33

— число звезд ярче 5"

Таблица 45.26. Характеристики некоторых шаровых скоплений

Скопление	Диаметр ядра, ПК	Расстояние, КПК	Интегральная видимая -чвезд-чина	Масса,
М5	12	8,5	5,9	6
М13	П	7.7	5,9	30
М92	10	10	6,5	14
М71	5	4,5	8.3	

Таблица 45. 27. Типичные параметры основных структурных компонентов межзвездного газа в спиральных ветвях Галактики [53]

Фаза	я и	S i	o 5 1	§ S,	ii! ii a l i i
Корональный газ		-0,003	—	—	-0,5
Зоны НИ низкой плотности	-10*	-3	–	–	-0,01
Теплые области HI	-103	-1	–	–	-0,01
Межоблачная среда	~104	-0,1	–	–	-0,5
Облака HI	-80	-10	-100	-10	—0,01
Темные облака	-10	-103	-300	-1	-10-s
Большие глобулы	~10	-10«	-20	-0.3	3- 10-9
Области НИ		-30	-300	-10	-10-^
Гигантские молекулярные облака	-20	-300	-3- 10^	-40	-3- 10-«
Уплотнения в молекулярных облаках	-6	-10®	-100	-0,5	–

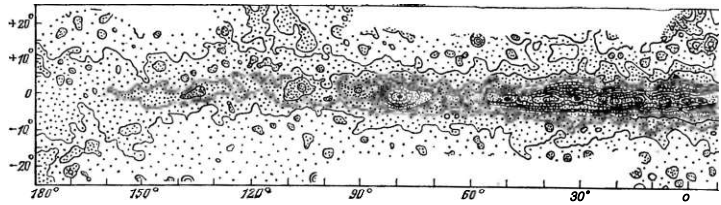


Рис. 45.36. Распределение •у-излучения (70 МэВ—5 ГэВ^

Межзвездный газ хорошо поглощает ионизирующее излучение. Это затрудняет наблюдения в ультрафиолетовом и длинноволновом рентгеновском диапазонах (рис. 45.37).

Таблица 45.28. Некоторые межзвездные молекулы [52, 55]

Молекула	Характерная длина	ig {*NJN*^)
		0
gh	9,6	- 8
OH	18	- 8
CN	0,27	—8
CO	0,26	- 4
SiO	0,23	—7
CS	0,20	—7
so	0,30	—7
	0,22	
SiS	0,33	—7
	0.27	
и^о	1,4	—7
Q H	0,34	- 6
HCN	0,34	—6
H^S	0,18	—8
ocs	0,25	- 8
NH3	1.3	~ 6
H2CO	6,2	- 8
HjCS	**И**	- 1 0
CHsNH	5,7	—10
HCOOH	18	- 1 0
CH3QH	0.35	—9

Туманности и остатки сверхновых. ***Планетарные туманности*** (табл. 45.29) [56] представляют собой сферические оболочки вокруг очень горячих (**ГийЗ**--^10® К) звезд, ультрафиолетовое излучение которых служит источником возбуждения атомов туманности. Планетарная туманность возникает, когда звезда на поздних стадиях эволюции сбрасывает верхние слои, образуя расширяющуюся оболочку.

Диффузные туманности бывают трех типов. ***Эмиссионные туманности*** (зоны НИ) возникают вокруг горячих звезд, ультрафиолетовое излучение которых ионизует окружающий межзвездный газ. В ***отражательных туманностях*** межзвездная пыль подсвечивается яркими звездами более поздднего спектрального класса (менее горячих), чем В2. В ***остатках вспышек сверхновых*** излучают нагретый ударной волной газ и релятивистские электроны (рис. 45.38).

Зависимость радиуса зоны НИ R, пк, от плотности среды N, см-^, и типа возбуждающей звезды имеет вид [1]

где So определяется по спектральному классу звезды:

класс	.05	08	BO	Б2	B5	AO
S	.100	65	35	15	3	1

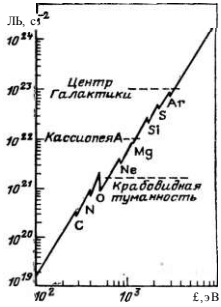
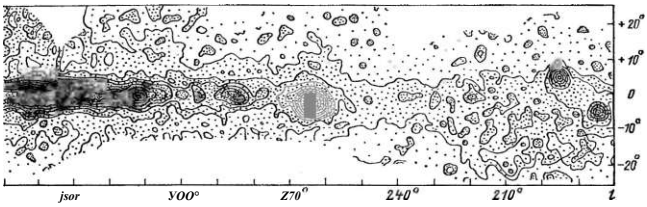


Рис. 45.37. Поглощение рентгеновского излучения межзвездным газом. Приведено число атомов водорода Nn на луче зрения, при котором оптическая толщина равна единице для данного значения энергии фотона ***Е*** [52]

Благодаря малой плотности газа зоны НИ интенсивно излучают в запрещенных линиях (табл. 45.30).

Параметры некоторых диффузных туманностей приведены в табл. 45.31, 45.32 (см. также рис. 45.39).

Межзвездные мазеры [59] В отдельных плотных образованиях межзвездного газа, расположенных рядом с сильными источниками возбуждения, может возникать мазерное излучение. Наблюдаются мазеры на вращательных переходах молекул OH, HjO, SiO и СНгОН (табл. 45.33). Различают мазеры, связанные с холодными звездами больших размеров, излучающими в инфракрасном диапазоне .(табл. 45.34), и мазеры,



по небу в галактических координатах Г54]

Таблица 45.29. Характеристики некоторых планетарных туманностей [1]

Туманность	л i i f f	1 t a	i I I I	's й: 2?	с 1 >5	1 й		I I I fill	e l l i j	i O. c
1С 418	800	12	36	4,1	0,09	0,04	0,66	+0,9	0	1500
NGC 3242	300	14	50	3,0	0,1	0,04	0,90	0,0	20	800
NGC 6572	800		50	4,0	0,05	0,10	0,24	+2,0	4	900
NGC 6720 («Кольцо»)	320	10	90	3,0	0,2	0,17	0,44	+0.1	19	700
NGC 7009	280	12	50	4,0	0,08	0,09	0,52	+0,8	19	700
Й§с7бб?	250	14	60	3,9	0,06	0.07	0,07	0,0	25	900

• Спектральный индекс *dig* (интенсивность)/d lg (частота).

Таблица 45.30. Коэффициенты вероятностей *А* спонтанных переходов для некоторых запрещенных линий, наблюдаемых в туманностях [57]

Переход	0:111		1	Ni1	01	
	Длина волны, им	**.4.** с->	**Длина волны, им**	А, с-«	Длина волны, нм	. . с -
"P, — W2	**500,684**	**0,021**	**658,34**	**0,0030**	**630,023**	**0,0069**
-	**495,891**	**0,0071**	**654,81**	**0,00103**	**636,388**	**0,0022**
	493,10	**1,9-10-6**	**652,74**	**4,2-10-'**	**639,2**	**1,1-10-e**
'D, - 'So	**436,321**	**1.6**	**575.48**	**1,08**	**557,735**	**1,28**

связанные с областями НИ вокруг молодых горячих звезд (табл. 45.35).

Межзвездная пыль и поглощение света звезд [1,61]. Приведем параметры межзвездной пыли и характеристики поглощения в межзвездном пространстве:

масса пылинок — около Ю-'^ г;

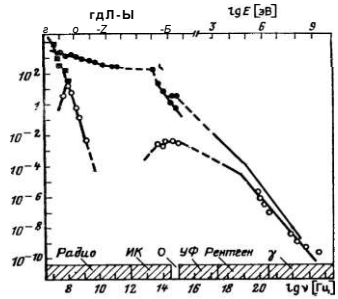
размер пылинок 10"^—10"^ см;

концентрация пылинок •— порядка Ю-*^ см-^;

плотность поглощающего вещества в межзвездном пространстве 10-^ кг/м®=0,0015 Л4©/пк®;

поглощение света звезд вблизи галактической плоскости в окрестностях Солнца характеризуется величиной Av—\,9 зв. вел./кпк.

Зависимость поглощения от^ длины волны излучения приводит к покраснению света звезд, которое характеризуется избытком цвета ^(Л,, Xj), представляющим собой разность поглощений на длинах волн и Яг, выраженных в звездных величинах (рис. 45.40). В качестве стандартных значений I, и Яг принимают центры полос ***В и V,*** Соответствующий избыток цвета



обозначается E_{B-V}. Для перехода от избытка цвета к абсолютному значению поглощения служит множитель

$$\wedge = \wedge V \ I \ \wedge_{B-} V-$$

В среднем R равен 3,1, но в темных облаках (табл. 45.36) может составлять 5—6.

Рис. 45.38. Спектры Крабовидной туманности (темные кружки), ее пульсара (светлые кружки) и компактного радиоисточника в центре туманности (квадратики) [32]. Обозначение диапазонов то же, что на рис. 45.7

Таблица 45.31. Характеристики некоторы

Тумашюся.	Тип	Расстояние, ПК	Диаметр.	Масса газа.	плотность. СМ®	Плотность потока излучения в Ю-о Вт/(м2.ср)	Плотность потока радиоизлучения (Х=20 СМ), Ян	Класс возбуждающей звезды
В звездном скоплении	С	126	1.5	—		—	—	В7
Плеяды (М45)								
В созвездии Орион (М42)	Е	460	5	300	600	13	440	0 8
«Конская голова»	СЕ	350	3	0,6	25	–		В1
«Тарантул»	Е	5.10«	250	10^			-	Группа звезд класса О
«Розетка»	Е	1,1-103	15	9-103	30	1.8	300	Об
«Лагуна» (М8)	Е	1,2.103	9	103	80	7	380	0 5
«Северная Америка»	СЕ	700	20	8-103	15	0.8	510	А2
«Кокон»	С	1.6-10»	2	7	70			В1
«Трехраздельная» (М20)	Е	10"	4	150	100	6~	30	0 7

Таблица 45.32. **Характеристики остатков сверхновых** [58]

			Радиоизлучение			Рентгеновское излучение		Оценка средней скорости расширения, км/с
					Спектральный индекс			
Кассиопея А (1680)		3.5	300	3100	—О,		15 и 60	5500
Сверхновая Кеплера (1604)		6.6	376	**20**	- о .			
Сверхновая Браге		10,7					6 и 40	5000
Сверхновая 1181			799		—0.1	Не обнаружено		
Крабовидная туманность (1054)			926		-0,2	310		1200
Сверхновая 1006	4		974		**—0,6**	0,2		1800
Сверхновая 185	2,5		1795		- 0 , 4	17		
1С 443	1.5		3400		—0,5			
Корма А	2.2		5000	145	—0,4			700
Парус Х	0,5		13 000	1800	—0,3			500
Петля в созвездии Лебедя	**0,8**		**20 000**		- 0 , 5			400
НВ21		35	>35000	225	—0,4			**<200**

1 u a 45.33. Параметры наблюдаемых мазерных переходов

^Пз/2	3/2 f = 1-^2	1612,231	18,6	1,29	10-И
	3/2 f = 1-^1	1665,402	18,0	7,11	10-u
	3/2 f=2-^2	1667,359	**18,0**	7,11	10-"
	3/2 f=2->1	1720,530	17,4	9,42-	10-12
	5/2 f=2-^2	6030,747	5,0	1,53-	10-8
	5/2 f=3-^3	6035,092	5,0	1,57-	10-9
	1/2 f=0->1	4660,242	6,4	**1,08.**	10-e
		4765,562	6,3	3,86-	10-10
	7/2	13441,371	**2,2**	9,26	10-9
		22235,080	1,35	1,9b	10-9
		43122,03	0,70	3,00.	10-6
iSt>=1,		86243,27	0,35	2,87,	10-^
v=\	/=2-^1	129363,12	0,23	1,04	io-«
f=1,		42820,48	0,70	2,93	10-e
f=2,		24933,468	**1,20**	8,40	10-8
CHsOH	5 fe=2->l	59,080	1,2C	8,74.	10-8
	6	25018,123	1,20	8,98.	10-8
	7 k=2-^1	25124,873	1,2C	9,21.	10-8
		25294,411	1,20		10-8

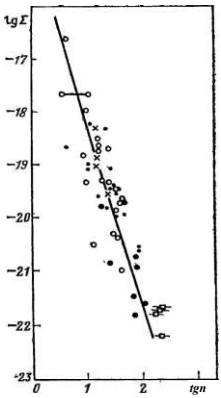


Рис. 45.39. Зависимость радиояркости S, Вт/(м='-Гц.ср). на частоте 1 ГГц от диаметра ***D,*** пк, остатка сверхновой [59]

Т а б л и ц а 45.34. Характеристики мазеров, связанных со звездами, излучающими в инфракрасном диапазоне

	н,о	он	SiO
Число наблюдаемых переходов	1	3	4
Число известных объектов	- 5 0	~5 0	16
Ширина линии, км/с	1 - 2	1 - 2	0 ,5 - 2
Кинетическая температура*1, К	400—1600	400-1600	250-3500
Число спектральных деталей	1—10	2—10*2	1—10
Диапазон скоростей, км/с	5 - 5 0	5 - 8 0	2 - 1 5
Поляризация	Нет	Мала	Нет (?)
Время жизни деталей, с	>10'	>10'	
Размер пятен, см	10"	10l=	<1o1<'
Яркостная температура, К	1011-101S	109—1011	>10^
Размер группы источников, см	10l6	2.1015	—
Мощность, Вт*з	101'-юя	101'-1021	10is_i02«

Определяется по ширине линий в предпол жения линий и крупномасштабных движений газа.
Больше у сверхгигантов.
В предположении изотропного излучения.

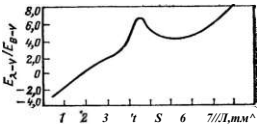


Рис. 45.40. Нормированная кривая межзвездного поглощения [52]

Отношение масс пыли и газа в разных облаках одинаково и равно примерно 10-2. Связь числа атомов Н на луче зрения ***Nn,*** см-^, с избытком цвета ***EB-V*** Дается выражением

$$JVh = 5{,}9.10^{1} E^{У},$$

Газово-пылевые комплексы и звездообразование [3, 52]. Значительная часть межзвездного газа в спиральных рукавах собрана в газово-пылевые комплексы размером десятки и сотни парсек. В них вкраплены плотные (**k**«10® **см**"®) холодные (Г^Ю К) молекулярные облака, в которых газ конденсируется в звезды (рис. 45.41). Молодые горячие звезды образуют вокруг себя *компактные зоны* НИ [62] размером 0,1—1 **ПК,** плотностью 10^—10® **СМ-®** и массой 1Q-^—1 М©,

Таблица 45.10. Характеристики спутниковых орбит [11] (в скобках указаны неустоявшиеся названия)

Величина	н,о	**ОН**	SiO	СНзОН
Число наблюдаемых переходов	1	**9**	4	4
Число известных объектов	- 5 0	- 5 0	1 «	1*1
Ширина линии, км/с	0,5 - 2	0,1 - 1	2	0,5
Кинетическая температура, К*^	100-1500	4—400	3500	150
Число спектральных деталей	1 - 1 0 0	1 - 5 0	5	3
Диапазон скоростей, км/с	1 - 3 0 0	1 - 3 0	25	4
Поляризация, %	0 - 1 0 (линейная)	0—100 (линейная) 0 - 1 0 0 (круговая)	0 - 2 0 (круговая)	Нет
Время жизни деталей, с*^	106-10^	10^-108		
Размер пятен, см	1013_10М	10W-101S	<10"'	<1016
Яркостная температура, К		10«—1013	>1013	>103
Размер группы источников, см	1018-10"	1016-10"	–	10"
Мощность, Вт*«	1020_1026	1020 — 1023	1022	1020

Единственный известный источник — Орион А.
В предположении, что нет сужения линий и крупномасштабных
Имеется несколько случаев, когда характерное время меньше.
В предположении изотропного излучения.

45.36. Статистические свойства пыщевых облаков [61]

Характеристика	Стандартное облако	Большое облако
Среднее значение облаке, Яр	0,061 (6)	0,29 (6)
k — число облаков на расстоянии 1 КПК	6,2 (3)	0.8 (2)
Селективное поглощение на 1 КПК, kEe	**0,38 (5)**	0,23 (I)

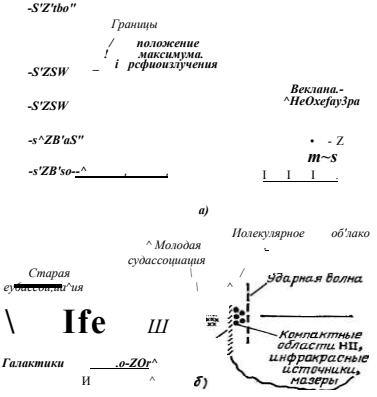


Рис. 45.41. Схема очага звездообразования, связанного с туманностью Ориона, (с) и типичная схема крупного очага звездообразования с бегущей по нему волной звездообразования (б) [53]:
/ — компактные зоны НИ; 2 — звезды Трапеции Ориона; 3 — НгО-мазеры; сплошной линией очерчены инфракрасные туман-

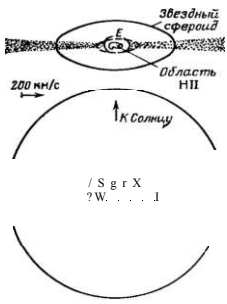


Рис. 45.42. Центр Галактики. Показаны положение радиоисточников Стрелец В2 и Стрелец А (с компонентами U7 и £•) и расширяющееся молекулярное кольцо [64]

которые в свою очередь окружены непрозра^ой оболочкой из пыли и газа. Эти оболочки переизлучают коротковолновое излучение центральной звезды в инфракрасном диапазоне (светимость Ю^—10^ i©)- Из молодых звезд происходит интенсивное истечение вещества, в котором возникают плотные (««10^ см-^) образования, движущиеся со скоростями около 100 км/с, — *объекты Хербига~Аро* [63]. Их температура — порядка 10^ К, светимости (в основном эмиссионные линии) 1—10^ L©, С областями звездообразования связаны мазерные источники. Скорость звездообразования в Галактике 4 Л^о/год. Вновь образовавшиеся звезды распределены по массам по закону: число звезд *dN* в интервале масс от *М* до Af-j-dM равно *dN=\p(M)dM,* где (функция Солпитера). Эта аппроксимация действует в области 0,3 М0<М<5ОМ© .

Центр Галактики [64, 65]. Межзвездное поглощение в направлении на центр Галактики превышает 27", поэтому наблюдать его можно только в радио-, инфракрасном или рентгеновском и ^-диапазонах. В центре Галактики расположены звездный сфероид массой около 10^ Л[0, а также вращающийся со скоростью 200 км/с газовый диск, состоящий из молекулярного и атомарного водорода (рис. 45.42). Центральная протяженная зона НИ имеет вид сфероида радиусом около 150 ПК и массой около Ю® М©.

Непосредственно в центре расположен радиоисточник Стрелец А Западный (Sgr AW). Его размер — менее 10^ м, мощность 3-10^® Вт. Полная инфракрасная светимость пыли в центральной области радиусом 1 пк составляет 2-10® . Для поддержания ионизации газа в центральной области и нагрева пыли, ответственной за инфракрасное излучение, мощность ионизирующего излучения центрального источника должна составлять (1ч-3)-10^ L©- Анализ распределения скоростей газа показывает, что в центральной области размером 1 пк сосредоточена масса примерно Ю® М©. В направлении на центр зарегистрирован источник излучения в ***у-линии*** 511 кэВ, соответствующей е+ е--аннигиляции. Мощность, излучаемая в линии, меняется за времена порядка 1/2 года и достигает 2-10^° Вт. Ширина линии — Полная светимость центра Галактики в диапазоне 10 кэВ — 10 МэВ составляет 3-Ю^' Вт.

На расстоянии 10 пк от центра расположен остаток сверхновой Стрелец А Восточный (Sgr АЕ), который удаляется от центра со скоростью 40 км/с. Радиоисточник Стрелец В2 (Sgr В2) представляет собой молекулярное облако размером около 30 пк и массой до 3-10» М©. Центр окружен молекулярным кольцом радиусом примерно 200 ПК, расширяющимся со скоростью 140 км/с и вращающимся со скоростью 50 км/с. Его масса — порядка 10^ /И©. В облаке Sgr В2 наблюдаются компактные зоны НП, мазеры, излучающие в линиях гидроксила и паров воды. В зоне центра обнаружено несколько рентгеновских источников. Один из них совпадает с Sgr AW. Его светимость в диапазоне £= =0,5ч-4,5 кэВ составляет 1,5-10=® Вт,

45.6. ГАЛАКТИКИ И ВСЕЛЕННАЯ

Структура и классификация галактик [66, 67]. Большинство галактик состоит из двух основных звездных компонентов: массивного диска и сфероидального компонента. Яркость сфероидального компонента / изменяется с радиусом г по закону

$$\lg W/ZnO)$$

где Гс — эффективный радиус. Яркость дисковой составляющей распределена в плоскости диска по закону

$$/ W/Zz (0) ^ \exp (-/-//-o),$$

где КПК, а в плоскости, перпендикулярной плоскости диска, — по закону

$$1 (2)//_3 (0) = ch\text{-}2 (z/2o),$$

где 2о«0,6-н0,8 КПК.

Эллиптические галактики [обозначение Еп, где п=0, 1 7, характеризует сжатие галактики е= =(о—О)/а, п=10 е] состоят практически только из сфероидального компонента. Их массы — от 10^ до 10>з Ж©, светимости — от 10^ до 10= L©. К этому типу принадлежит почти 25% всех галактик.

В *спиральных галактиках* (обозначение Sa, Sb, Sc в соответствии со степенью развития спиралей) преобладает дисковая составляющая, но сфероидальный компонент присутствует всегда. Выделяют спиральные галактики с перемычкой (3Ва, SBb, SBc). Доля галактик этих двух типов составляет почти 50%. Их массы — порядка 10®—10>2 М©, светимости 10»—10" L©. Промежуточными между эллиптическими и спиральными галактиками являются галактики линзовидного типа (SO). К нему принадлежит 20% всех галактик. *Неправильные галактики* Irl и IrП подразделяются по типу их звездного населения (I и II соответственно). Их массы не превышают Ю'" М©, светимости — 10'° L©,

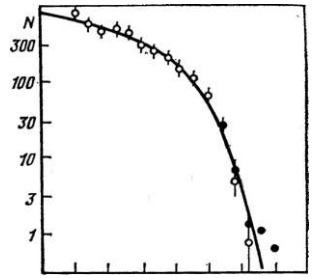


Рис. 45.43. Функция светимости галактик. По оси ординат отложено число галактик *N,* по оси абсцисс — абсолютная звездная величина в полосе *J,* характеризуемой соотношениями Я=0,5 мк, А?i=0,07 мк, Mj=^Mv+ -f0,35 (Мв-Mv) [54]

Таблица 45.37. Отношение масса — светимость и массовая доля нейтрального водорода для галактик различных типов [48, 67]

Тип галактик	*(MIDHMqILQ)*	МНI /Л^
E	20—40	~0
SO	10	0,005
Sa	10	0,03
Sb	10	0,05
Sc	<10	0,07
Irl	<10	0,2

Параметры различных типов галактик приведены в табл. 45.37. Распределение галактик по светимостям L имеет вид (рис. 45.43)

$$\Phi(L)\,dL = \Phi^* \exp(-L/L^*)\,d(L/L^*),$$

где Φ^*=1,5-10-® Мпк-^; светимости L^* соответствует абсолютная звездная величина —21. Плотность светимости галактик pi/=10® LqMhk-^.

Ближайшие к нам галактики объединены в гравитационно связанную систему, называемую Местной группой '(табл. 45.38), Характеристики некоторых других галактик приведены в табл. 45.39,

Некоторые яркие галактики [I]

Т а б л и ц а 45.38. Население Местной группы галактик [3]

Состав семейства с указанием созвездия, в котором находится					
	Галактика (центр в Стрельце)	Sb	10	- 2 1	250 ООО
	Большое Магелланово Облако	Ir	52	- 1 8	14 000
	Малое Магеллановo Облако (Золотая Рыбка)	Ir	71	- 1 6	5000
	Печь	Ep	188	—13	20
	Скульптор	Ep	84	- 1 2	3
	Леѣ I	Ep	220	- 1 1	4
		Ep	76	- 9	0,1
	Малая Медведица	Ep	67	- 9	0.1
	Лев И	Ep	220	- 9	1
	Пегас	Ep	170	- 9	—
	Орион	Ep	80		-
	Козерог	Ep	70	- 6	—
	Большая Медведица	Ep	120	- 6	—
	Большая Медведица	Ep	130	—	—
	Секстан С	Ep	140		—
	Змея	Ep	30	—	—
	Киль	Ep	170		—
Туманности Андромеды	Андромеда (М31, NGC224)	Sb	690	- 2 2	360 000
	Треугольник (М33, NGC598)	Sc	720	—19	20000
	Андромеда (М32)	E2	690	- 1 6	2600
	Андромеда (NGC205)	SBO	690	- 1 5	2000
	Кассиопея (NGC 185)	E3	690	— 15	100
	Кассиопея (NGC 147)	E5	690	—14	150
	Андромеда 1	Ep	690	- 1 1	1
	Андромеда И (Рыбы)	Ep	690	- 1 1	1
	Андромеда III	Ep	690	- 1 1	1
	Андромеда IV	Ir	690	- 1 1	10
	Рыбы	Ir	690	- 9	10
Периферия Местной группы	Кассиопея (1С 10)	Ir	1250	- 1 7	15 000
	Кит (1С 1613)	Ir	770	- 1 5	400
	Стрелец (NGC 6822)	Ir	600	- 1 5	1500
	Кит (галактика Вольфа — Лундмарка — Меллотта)	Ir	1300	- 1 4	300
	Секстан А	Ir	1300	- 1 4	1000
	Лев А	Ir	1100	- 1 3	400
	Козерог	Ir	1000	— 11	30
	Дева	Ir	1000	- 1 1	40
	Скульптор	Ir	1400	- 1 0	10
	Стрелец	Ir	500	- 9	10

NGC55	Sc	—19,9	10,5
M81	Sb	**—20,**	11,2
M82	Ir11	-19,6	10.5
NGC 3115	E7	-19,3	10,9
M87	Fl	-21,7	12.6
M104 «Сомбреро»	Sa	-22	11,7
Центавр А (NGC5128)		-20	11,3
M51 «Водоворот»	*Ш'*	-19,7	10,9
M83	SBc	**-20,6**	

· а видимого вещества. Имеются основания считать, что шассы многих галактик значительно больше, поскольку они окружены массивными невидимыми коронами.

Активные галактики и квазары [3]. Активные галактики характеризуются:

компактного ядра со светимостью 10^—

быстрой (месяцы и дни) переменностью излучения;

нетепловым спектром с избыточными потоками в радио-, инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах (рис. 45.44);

4) широкими (102—10^ км/с) эмиссионными линиями (рис. 45.45);

5) пекулярным внешним видом, свидетельствующим 0 взрыве, наличии выбросов типа струй.

Выделяют следующие основные типы активных галактик.

Сейфертовские галактики — спиральные (как правило) галактики с маленькими и аномально яркими ядрами. Ширины эмиссионных линий у сейфертовских галактик I типа 1000—3000 км/с, у II типа 500—1000 км/с. Светимость в инфракрасном и оптическом диапазонах 108®—10'® Вт. Сейфертовские галактики 1 типа имеют сравнимые светимости в рентгеновском диапазоне. Спектр в диапазоне £=1^100 кэВ обычно степенной.

Квазары — точечные источники светимостью в инфракрасном, оптическом и рентгеновском диапазонах 10М_10« Вт. Ширина эмиссионных линий 4000—6000 км/с. Примерно 1% квазаров являются радиоисточниками мощностью до Юээ Вт. Квазары — самые мощные объекты в наблюдаемой Вселенной (рис. 45.46), Самый далекий известный квазар имеет красное смещение 2=4,04.

Лацертиды (объекты типа BL Ящерицы) — источники, подобные квазарам Отличаются отсутствием эмиссионных линий и сильной (10—30%) переменной поляризацией излучения.

Радиогалактики — эллиптические (как правило) галактики со светимостью в радиодиапазоне 10'®—10^8 Вт. Большая часть имеет двойную структуру: симметрично относительно центрального источника на расстоянии до нескольких мегапарсек расположено два радиоизлучающих облака. Спектр радиоизлучения обычно степенной (рис. 45.47).

Распределение активных галактик по светимости и спектральным индексам показано на рис. 45.48—45.50.

Скопления галактик [74]. Распределение галактик в пространстве сильно неоднородно. Функция корреляции галактик

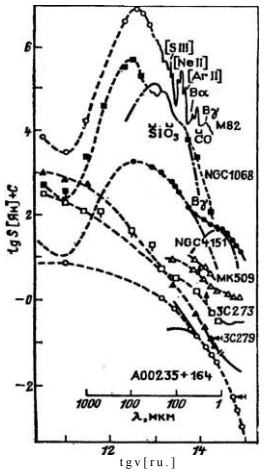


Рис. 45.44. Спектры активных галактик в инфракрасном, оптическом и радиодиапазонах. Для компактности спектры сдвинуты вдоль оси ординат, каждый на определенную величину С. Приведены спектры «взрывающейся галактики» М82 (С=3,77), сейфертовской галактики II типа NGC1068 (С=3,07), сейфертовских галактик I типа NGC4151 (С=2,5) и MK509 (1,77), квазаров 3С273 (С=1) и 3С279 (С=2) и лацертида А00235-И64

(С=0) [68]

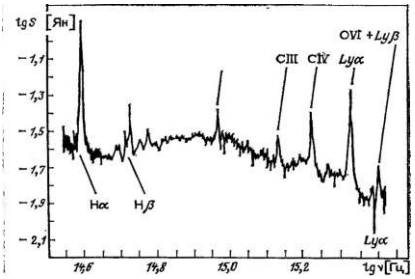


Рис. 45.45. Спектр квазара 3С273 в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах [69]

$$f\{Ю = (N(в) N(в(в)y/(m(в)\},$$

где N — плотность галактик, имеет вид [751 |f/?)= = (/?o//?)Г, i?o=(4,23±0,52)fc-' Мпк; ^=1,77(4). Здесь fi=ff/50, где H — постоянная Хаббла, км/(с-Мпк). Эта функция^ ^удовлетворяет данным наблюдений при

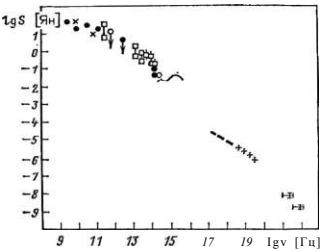


рис. 45.46. Спектр квазара 3С273 от радио- до ^-Диапазона [70]

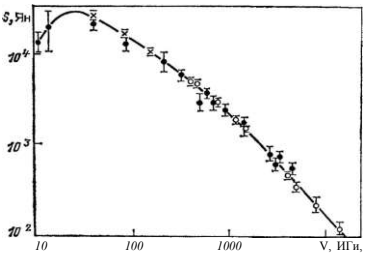


Рис. 45.47. Спектр радиогалактики Лебедь А [54]



Рис. 45.48. Распределение спектральных индексов и активных галактик в рентгеновском диапазоне:
N — число галактик; *a*- dig (интенсивность)/cr1й (частота) [71]

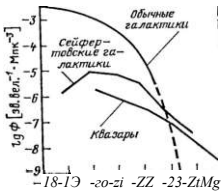


Рис. 45.49. Функция Ф светимости активных галактик. По оси абсцисс отложена абсолютная звездная величина в полосе *B* [72]

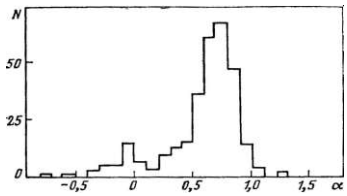


Рис. 45.50. Распределение спектральных индексов а радиогалактик в диапазоне^частот от 178 до 1400 МГц

Значительная часть галактик сосредоточена в скоплениях (рис. 45.51). Типичные массы скоплений 10'—10'® ЛГ©, они содержат сотни и тысячи галактик (табл. 45.40). Богатыми называются скопления, в которых в радиусе 3/г-' Мпк от центра скопления содержится не менее 50 галактик в диапазоне от т^ до где Шз — звездная величина третьей по яркости галактики в скоплении. Плотность галактик в центральных частях богатых скоплений распределена по закону Кинга

где Гс=0,25(4) /г-' Мпк. Полный диаметр скоплений достигает 3—5 Мпк. Скопления заполнены газом с

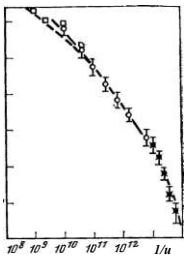


Рис. 45.51. Функция светимости скоплении и групп лактик [3]

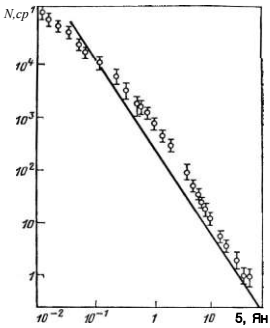


Рис. 45.52. Подсчеты радиоисточников на частоте 408 МГц:

сплошная линия — закон S-^P. Отклонения от этого закона в области больших S означают, что в прошлом радиоисточников было больше и (или) они были ярче, уплощение кривой подсчетов при малых S — результат космологических эффектов [79]

Таблица 45.40. Некоторые скопления галактик

Скопление	Число наблюдаемых галактик	Расстояние*, Мпк [2]	Угловой граТЙ	Оптическая светимость, 10" L q [2]	Дисперсия скоростей галактик вдоль луча Зрения, км/е	Температура газа, кэВ [78]	Рентгеновская светимость (2—10 кэВ), 10" Вт [78]
Персей {А426)	500	120	4	10	1400	6,8	12,3
Дева	2500	23	12	12	700	2,2	0,3
Волосы Вероники (А1656)	800	135	4	50	900	8,8	7,6

* Для Я = 50 км/(е-Мпк).

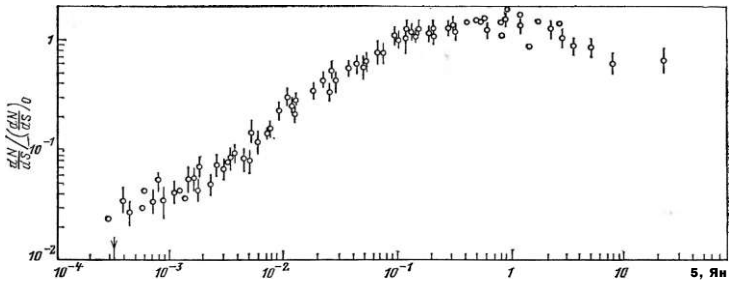


Рис. 45.53. Подсчет радиоисточников на ***X=21*** см:

кривая ***DNDS,*** ср-'-Ян-', нормирована на закон (dW/dS)„=225 ***S-V-*** Отклонение от этого закона в области больших S свидетельствует о том, что к настоящему времени число радиоисточников уменьшается. Спад в области малых S связан с неевклидовостью нашего мира [80]

температурой порядка Ю® К и плотностью около 10-^ см-^. Наблюдается тормозное рентгеновское излучение этого газа. ФУНКЦИЯ корреляции скоплений в диапазоне 5h'^<R<100 ft"» Мпк имеет вид f76]

$$\pounds\,(/?) = (RJR)'',\ \wedge = 1{,}6,\ \text{До} = 50/1\text{-}1\ \text{Мпк}.$$

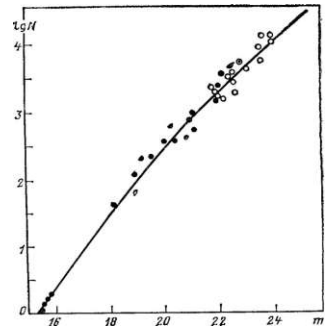


Рис. 45.54. Число галактик ***N(m)*** ярче видимой величины *m* на квадратный градус [81]

В еще больших масштабах наблюдаются сверхскопления. Характерный размер сверхскопления — около 30 Мпк, масса — порядка Ю'в ***MQ.*** Типичное сверхскопление содержит два-три богатых скопления [77].

Подсчеты источников [79]. В евклидовом мире, однородно заполненном источниками, число источников ***N(S),*** плотность потока от которых больше S, удовлетворяет закону iVccS-®/2 (в дифференциальной форме dA'/dSocS-6/2). Отклонения результатов подсчетов от этого закона объясняются эволюцией источников, а также космологическими эффектами (рис. 45.52—45.54).

Фоновое излучение (рис. 45.55). В него вносят вклад далекие галактики, горячий межгалактический газ, а также реликтовое излучение (микроволновое фоновое излучение), оставшееся после ранних горячих стадий развития Вселенной. Параметры фонового излучения в различных диапазонах приведены в табл. 45.41,

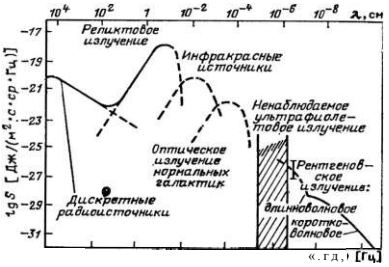


Рис- 45.55. Спектр электромагнитного фонового излучения во Вселенной:

Микроволновое фоновое излучение [83], называемое реликтовым, имеет спектр, близкий к спектру излучения черного тела с температурой Г=2,7 К (рис. 45.56), и Характеристики:

плотность энергии 0,25 эВ/см^;

скорость движения Солнца относительно микроволнового фона 300—400 км/с в направлении 0=12", 6-0°;

возникающая в результате движения Солнца дипольная анизотропия яркости б7'/Г= 1,3-10"^ cos 6, где 6 — угол между направлением движения и направлением наблюдения;

Таблица 45.41. Плотность энергии и числа фотонов фонового излучения в различных диапазонах [82]

Диапазон	Плотность энергии излучения.	Плотность числа фотонов, см-2
Длинноволновый радиодиапазон		~ 1
Микроволновое фоновое излучение	~0,25	-400
Инфракрасный		~ 1
Оптический	-3-10-8	
Длинноволновый рентгеновский (Е < 1 кэВ)	^10-4—10-5	3-(10-'Ч- 10-8)
Коротковолновый рентгеновский (£ > 1 кэВ)		
•у-Излучение:		
£ = 1 ч- 6 МэВ	~3-10-6	
£ > 10 МэВ	10-S-	10-12

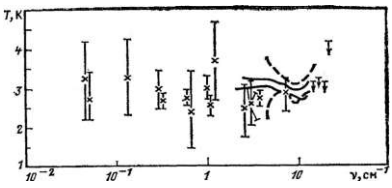


Рис. 45.56. Измерения яркостной температуры Т микроволнового фонового излучения на разных длинах волн

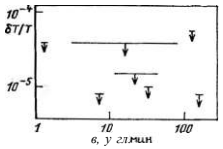


Рис. 45.57. Ограничения на флуктуации температуры микроволнового фонового излучения в различных угловых масштабах [84]

квадрупольная анизотропия яркости 67'<2-10-^ К-Ограничения на мелкомасштабные флуктуации яркости пр!1ведены на рис. 45.57.

Космология. Основные параметры нашей Вселенной таковы:

постоянная Хаббла Я=50-^100 км/(с-Мпк);

критическая плотность вещества (при которой Вселенная оказывается замкнутой) ре=4,7-Ю-^^/г^ *г/м*\ где *h=H/50* км/(с-Мпк);

плотность наблюдаемого вещества ря^Ю"^' г/см^;

отношение числа барионов к числу фотонов Nb/Ni^ = (3-10)-10-><« [85];

параметр плотности барионов Qb=pb/pc, 0,01.^ <0 6<0,14 [86];

плотность реликтовых нейтрино (трех сортов) [88] 450 см-3;

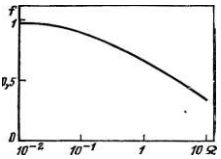


Рис. 45.58. Функция *f(Q)*, входящая в выражение для возраста Вселенной [85]

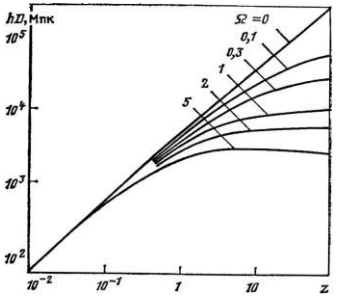


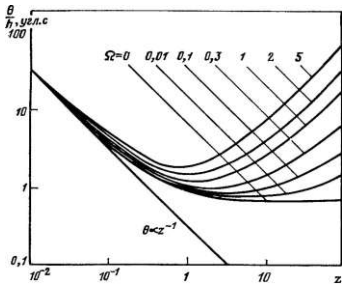
Рис. 45.59. Зависимость расстояния до источника *D* от красного смещения z для различных значений fi = p/pe-Расстояние определено таким образом, что плотность потока пропорциональна D-^ [85]

космологическое ограничение на сумму масс нейтрино всех сортов [88] эВ;

возраст Вселенной в годах <=(Ї,96//i) fCfij-lO'", где функция показана на рис. 45.58. Здесь Q — плотность всех видов материи, выраженная в единицах критической плотности pc.

Расширение Вселенной приводит к тому, что излучение далеких источников испытывает красное смещение тем большее, чем дальше источник (рис. 45.59), Поэтому положение источников характеризуется величиной *г = (X* — г д е Яо и Я, — длины волн излучения, испущенного и принятого наблюдателем. Неевклидов характер Вселенной иллюстрируется рис. 45.60. Из него видно, что угол, под которым видно тело фиксированного размера, не падает до нуля с увеличением расстояния, а, достигнув определенного минимального значения, начинает расти.

На ранних стадиях эволюции Вселенная была заполнена горячей плазмой, которая охлаждалась в процессе расширения. Приблизительно через 500 с после



Рис, 45.60. Зависимость углового размера 6 источника размером 10 кпк от его красного смещения z [85]

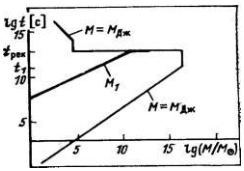


Рис. 45.62. Гравитационная неустойчивость во Вселенной. По оси ординат отложено время от начала расширения Вселенной, по оси абсцисс — масса возмущения (рЯ,^возм). Отмечены момент t^, когда сравниваются плотности вещества и излучения, и момент рекомбинации водорода; Л!Дж—джинсовская масса (минимальное значение массы, при которой начинается гравитационная неустойчивость); Mi—максимальная масса возмущений, затухших к данному моменту времени под действием лучистой вязкости и теплопроводности; [85]

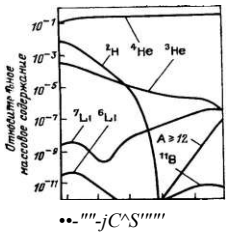


Рис. 45.61. Зависимость относительных содержаний элементов, образовавшихся в ходе космологического нуклеосинтеза, от плотности барионов в настоящее время. Расчеты проведены для современной температуры микроволнового фонового излучения 2,7 К [871. Измерения дают следующие значения относительного массового содержания: 2H/iH>10-5,'Li/iH«10-«'', (2H-|-SHe)/iH < <10-^ [86]

начала расширения, когда температура упала до 108 К, прекратились ядерные реакции, которые поддерживали равновесие между нейтронами и протонами. В конце этой стадии происходил интенсивный синтез элементов (рис. 45.61), в частности образовалась большая часть наблюдаемого гелия. Примерно через 200 тыс. лет при Г=4000 К произошла рекомбинация водорода (гелий рекомбинировал несколько раньше), после чего Вселенная стала практически прозрачна для заполняющего ее теплового излучения. Благодаря этому становится возможным рост возмущений плотности вещества (до рекомбинации этому препятствовало давление излучения), который в конечном итоге приводит к обр
нию гравитационно связанных тел — скоплений,
тик и т. д. (рис. 45.62).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен К. У. Астрофизические величины: Пер. с англ./Под ред. Д. Я Мартынова Перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1977.

2. Ленг К. Астрофизические формулы: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. Т. 1, 2.

3. Физика космоса: Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1986.

4. Куликовский П. Г. Звездная астрономия. М.: Наука, 1978

5. Гибсон Э. Спокойное Солнце: Пер. с англ./Под ред. Э. В. Кононовича. М.: Наука, 1977.

6. Bahcall J. N., Huebner W. F., Lubow S. H. e. a.// Rev. Mod. Phys. 1982. Vol. 54, N 3. P. 767—800.

7. Шкловский И. С. Физика солнечной короны. М.: Физматгиз, 1962.

8. Воронцов С. В., Жарков В. Н.//Успехи физ. наук. 1981. Т. 134, вып. 4. С. 675—710

9. Поток энергии Солнца и его измерения/Под ред. О. Уайта: Пер. с англ. М.: Мир, 1980.

10. Крюгер А. Солнечная радиоастрономия и радиоастрофизика: Пер. с англ./Под ред. В. 3 Зайцева. М.: Мир, 1984.

И. Mercury. 1983. Vol. XII, N 4, P. 118—119.

12. Russel C. T.//Advances Space Research. 1981. Vol. 1, N 7. P. 257—264.

13. МароВ М. Я. Планеты Солнечной системы. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1986.

14. Ip W. H.//Space Sci Rev. 1980. Vol. 26, N 1. P. 39—96.

15. Симоненко А. Н. Метеориты—осколки астероидов. М.: Наука, 1979.

16. Чурюмов К. И. Кометы и их наблюдения. М.: Наука, 1980.

17. Stern D. P., Ness N. F.//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1982. Vol. 20. P. 139—162.

18. Akasofu S. I.//Ibid. P. 117 138.

19. Baranov V. B.//Comm. Astrophys. 1981. Vol. IX, N 2. P. 75—91.

20. КурТ В. Г.//Астрофизика и космическая физика/Под ред. Р. А. Сюняева. М.: Наука, 1982. С. 268-292.

21. Мартынов Д. Я. Курс общей астрофизики. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1979.

22. Grossman A. S., Hays D., Grabaske H. C.//Astron. Astrophys. 1974. Vol. 30, N 1. P. 95—103.

23. Кокс Дж. П. Теория звездных пульсаций: Пер. с англ./Под ред. Д. К. Надежина. М.: Мир, 1983
24. Bath G. T. Quart. Roy. Astron. Soc. 1978. **Vol.** 19, N 2. P. 442—455.
25. Robinson E. L.//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1976 Vol. 14. P. 119—142.
26. Горбацкий В. Г. Новоподобные и новые звезды. М.: Наука, 1974.
27. Rydgren A. E., Strom S. E., Strom B. H.//Astrophys. J. Suppl. 1976. Vol. 30, N 3. P. 307—336.
28. Cohen M.//Phys. Rep. 1984. Vol. 116. N 3. P. 173—232.
29. Гершберг Р. Е. Вспыхивающие звезды малых масс. М.: Наука, 1978.
30 Боярчук А. А.//Итоги науки и техники. Сер. астрой. М.: ВИНИТИ, 1983. Т. 22. С. 83-111.
31. Trimble V.//Rev. Mod. Phys. 1982. Vol. 54. N 4. P. 1183—1224.
32. Шкловский И. С. Сверхновые звезды. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976.
33 Шапиро е., Тьюкольски С. Белые карлики, черные дыры и нейтронные звезды: Пер. с англ./Под ред. Я. А. Смородинского. М.: Мир, 1985.
34. Van Horn H. M.//Phys. Today. 1979. Vol. 32, N 1. P. 23-30.

Г. Пульсары:

А. Д. Кузьмина. М.: Мир, 1979.
36. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары: Пер. с англ./Под ред. А. Д. Кузьмина. М.: Мир, 1980.
37. Backer D. C., Kumarni S. R., Heiles C. e. a.//Nature. 1982. Vol. 300, N 5893. P. 615—618.
38. Liang H. P., Nolan P. L.//Space Sci. Rev. 1984. Vol. 38, N 314. P. 353—384.
39. White N.//Advances Space Res. 1984. Vol. 3, N 10—12. P. 9—18.
40. Borner G.//Phys. Rep. 1980 Vol. 60, N 3. P. 153—203
41. White N. E., Swank J. H., Holt S. S.//Astrophys. J. 1983. Vol. 270, N2. P. 711-734.
42. Sunyaev R. A., Trumpet J.//Nature. 1979. Vol. 279. P. 506-508.
43. Holt S. S., McCray R.//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1982. Vol. 20. P. 323—366.
44. Мазец Е. П., Голенецкий С. В.//Астрофизика и космическая физика/Под ред. Р А. Сюняева. М.: Наука, 1982. С. 216-267.
45. Владимирский Б. М., Гальпер А. М., Лучков Б. И. и др.//Успехи физ. наук. 1985. Т. 145, вып. 2. С. 255-284.
46. Марочник Л. С., Сучков Л. А. Галактика. М.: Наука, 1984.
47. Kinematics, Dynamics and Structure of the Milky Way/Ed. by W L. H. Shuter. Dordrecht: D. Reidel. 1983.
48. Faber S. M., Gallagher J. S.//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1979. Vol. 17. P. 135—188.
49. Bachall J. N., Soneira R. M.//Astrophys. J. Suppl. 1980. Vol. 44, N 1. P. 73—110.
50. Ефремов Ю. Н.//Итоги науки и техники. Сер. астрон. М.- ВИНИТИ, 1985. Т. 27. С. 102—203.
51. Холопов П. Н. Звездные скопления. М.: Наука, 1981.
52. Каплаи С. А., Пикельнер С. Б. Физика межзвездной среды. М.: Наука, 1979.
53. Бочкарев Н. Г.//Звезды и звездные системы/Под ред. Д. Я. Мартынова. М.: Наука, 1981. С. 265—325.
54. Лонгейр М. С. Астрофизика высоких энергий: Пер. с англ./Под ред. Р. А. Сюняева. М.: Мир, 1985.
55. Тернер Б. Е.//Галактическая и внегалактическая радиоастрономия/Под ред. Г Л. Верскера и К. И. Келлермана: Пер. с англ. М.: Мир. 1976. С. 303—371.
56. Костикова Е. Б. Физика планетарных туманностей. М.: Наука, 1982.
57. Соболев В. В. Курс теоретической астрофизики. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1985.
58. Псковский Ю. П.//Звезды и звездные системы/Под ред. Д. Я. Мартынова. М.: Наука, 1981. С. 88—117
59. Лозинская Т. А.//Итоги науки и техники. Сер астрон. М.: ВИНИТИ, 1983. Т. 22. С. 33—82.
60. Моран М. В.//На переднем крае астрофизики/Под ред. Ю. Эвретта: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. С. 405—458.
61. Спитцер Л. Физические процессы в межзвездной среде. Пер. с англ./Под ред. Д. А. Варшаловича. **М.:** Мир, 1981.
62. Habing H. J., Israel F. P.//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1979. Vol. 17. P. 345—383.
63. Schwarts R. D.//Ibid. 1983. Vol. 21. P. 209-238.
64. Oort J. H.//Ibid. 1977. Vol. 15. P. 295—362.
65. Центр Галактики/ Под ред Г. Р. Риглера и Р. Д. Блендфорда: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
66. Засов А. В.//ИТОГИ науки и техники. Сер. астрон. М.: ВИНИТИ, 1981. Т. 18. С. 3-47.
67. Тейлер Р. Дж. Галактики: строение и эволюция: Пер. с англ./Под ред. А. Г. Дорошкевича. М.: Мир, 1981.
68. Rieke G. H., Lebofsky M. J.//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1979. Vol. 17. P. 447—512.
69. Puetter R. C.. Burbidge E. M., Smith H. E. e. a.// Astrophys. J. 1982. Vol. 257. P. 487—498.
70. Ulrich M. H.//Space Sci. Rev. 1981. Vol. 28, N 1. P. 89—104.
71. Mushotsky R. F.//Advances Space Research. 1984. Vol. 3, N 10—12 P. 157—166.
72. Meurs E. J., Wilson A. A.//Astron. Astrophys. 1984. Vol. 136, N 1. P. 206—226.
73. Пахольчик А. Радиогалактики: Пер. с англ. **М.:** Мир, 1980.
74. Bahcall N.//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1977. Vol. 15. P. 505—540.
75. Пиблс Ф. Дж. Структура Вселенной в больших масштабах: Пер. с англ./Под ред. А. Г. Дорошкевича. М.: Мир, 1983.
76. Клыпин А. А., Копылов А. И.//Письма в астрон. журн., 1983. Т. 9, № 2. С. 75—81.
77. Oort J. H.//АПП. Rev. Astron. Astrophys. 1983. Vol. 21. P. 373—407.
78. Mushotsky R. P., Serlemitsos P. J., Smith B. W. e. a.//Astrophys. J. 1978. Vol. 225, N 1. P. 21—38.
79. Лонгейр М.//Успехи физ. наук. 1969. Т. 99, вып. 2. С. 229—248.
80. Windhorst R. Ph. D. Thesis. University of Leiden, 1984.
81. Караченцев И. О., Копылов А. И.//Письма в астрон. журн. 1977 Т. 3, № 6. С. 246—250.
82. Лонгейр М. С., Сюняев Р. А.//Успехи физ. наук. 1971. Т. 105, вып. 1. С. 41—96.
83. Weiss R.//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1980. Vol. 18. P. 489—536.
84. Partridge R. B.//Phys. Scripta. 1980. Vol. 21, N 2. P. 624—629.
85. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
86. Yang J., Turner Ж. S., Steigman G.//Astrophys. J. 1984. VOL 281, N 2. P. 493—511.
87. Дэвис М.//На переднем крае астрофизики/Под ред. Ю. Эвретта: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. С. 494—546.
88. Зельдович Я- Б., Сюняев Р. А.//Письма в астрон. журн. 1980. Т. 6, № 8. С. 451—456.

ГЛАВА 46

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

К. А. Кикоин

Периодическая система отражает закон изменения физико-химических свойств элементов с изменением заряда ядра *Z* и числа электронов во внешней оболочке атомов (периодический закон).

В первоначальном варианте таблицы Д. И. Менделеева элементы располагались в порядке возрастания атомных масс и группировались по сходству химических свойств. Объяснение периодическому закону и структуре периодической системы в дальнейшем было дано на основе квантовой теории строения атома. Оказалось, что последовательность расположения элементов в таблице определяется зарядом ядра, а периодичность физико-химических свойств связана с существованием электронных оболочек атома, постепенно заполняющихся с возрастанием *Z*.

Состояние электрона в атоме зависит от главного квантового числа и, орбитального квантового числа I, его проекции ***m,*** спинового числа s и его проекции 0-Электроны с разными ***n*** и ***I*** образуют разные оболочки. С учетом принципа Паули число электронов в оболочке с индексом I не может быть больше 2(2Z-f1). В зависимости от значения l=Q, 1, 2, 3... оболочки обозначают буквами S, ***p, d, f, g, h. i, k, I, m ...***

Современная таблица химических элементов построена таким образом, что при переходе от какого-либо элемента к следующему заряд ядра увеличивается на единицу и к оболочке добавляется один электрон. Заряд ядра определяет порядковый номер элемента.

По способу заполнения электронных оболочек все элементы разбиты на периоды. В первый период входят два элемента (H, He), у которых застраивается 1 s-оболочка. Второй и третий периоды содержат по восемь элементов, у которых застраиваются сначала s2-оболочки (2s2 и 3s2), а затем p®-оболочки (2 p® и 3p®). Первые три периода обычно называют малыми.

Периоды с четвертого по седьмой занимают в таблице по два ряда; их обычно называют большими. У элементов четвертого и пятого периодов прежде всего застраиваются в^-оболочки (4 5^ и 5 s'). После этого заполняются ^'^-оболочки предыдущих слоев (3d" и 4dio) и, наконец p^-оболочки (4 p^ и 5p»). Оба эти периода содержат по 18 элементов.

Оболочки элементов шестого и седьмого периодов также застраиваются в одинаковой последовательности: сначала заполняются внешние s-оболочки (6 s^ и 7 s'), после этого появляется один электрон в предыдущей d-оболочке (в атомах La и Ac), но у последующих элементов в основном заполняются глубокие f-оболочки и 5f^) и лишь после этого достраиваются d-оболочки (5 d'" и 6 ***d°).***

Элементы, у которых заполняются не внешние, а более глубокие оболочки, называют переходными. Так, в четвертом периоде к переходным относятся элементы от Sc до Zn, у которых застраиваются 3 d-оболочки, в пятом — от Y до Cd (4 d-переходные элементы), в шестом — от La до Hg, в седьмом — все актиноиды.

Седьмой период остался недостроенным, поскольку у элементов с *Z>83* отсутствуют устойчивые изотопы, причем их нестабильность возрастает с увеличением Z. Таблица, таким образом, заканчивается последним из полученных искусственным путем элементов с Z-107. Неустановившиеся названия, недостоверные электронные конфигурации и гипотетические массовые числа наиболее долгоживущих изотопов радионуклидов приведены в скобках.

Взаимодействие электронов в оболочках приводит к тому, что у некоторых элементов оболочки заполняются не так, как им предписывает система: в четвертом периоде в атомах Cr и Cи число d-электронов увеличивается на два по сравнению с предшествующими им V и Ni за счет одного из 4 s-электронов; в пятом периоде подобная «аномалия» наблюдается у Nb, Mo, Ru Rh, Pd, Ag, причем у Pd r d-оболочку «переходят» оба 5 8-электрона; наконец, в шестом периоде на один s-электрон меньше, чем остальные, имеют атомы Os Pt и Au; в f-переходных металлах конкурируют по энергии f- и d-состояния, поэтому у некоторых элементов очередной электрон попадает не в 4 f- (5/)-оболочку, а в 5d- (6d)-оболочку: это происходит у Gd Tb, Lu в группе редких земель и у Pa, U, Np, Cm Bк' Lw — в группе актиноидов.

Кроме горизонтального разделения элементов в таблице по периодам производится вертикальное разделение их по группам. Элементы, входящие в каждую группу, имеют одинаковое строение внешних электронных оболочек. В помещенное на форзаце «коротком» варианте таблицы каждый из больших периодов разбит на два ряда, помещенных один под другим поэтому наряду с главными группами возникают побочные В первых двух группах главную подгруппу составляют элементы, имеющие соответственно один и два s-электрона на внешней оболочке (2, 3, 4, 6, 8 и 10-й ряды), а в побочную подгруппу выделяются элементы с заполненными d-оболочками (5, 7 и 9-й ряды). В группах с П1 по Vn переходные элементы относятся к побочным подгруппам (4, 6, 8 и 10-й ряды), а элементы с незаполненными p-оболочками — к главным (2, 3, 5, 7 и 9-й ряды). Водород может быть отнесен к первой главной подгруппе как имеющий один электрон в s-оболочке и к седьмой, поскольку ему не хватает до заполненной оболочки одного электрона (см. пунктирную линию на рис. 46.1, которая указывает на эти две возможности). У элементов инертных газов, составляющих восьмую группу, застроены все оболочки. Эти элементы замыкают периоды. Названия элементов главных подгрупп в таблице смещены влево, а побочных — вправо. В отдельные группы (триады) выделены переходные элементы с почти заполненными d-оболочками (группы железа, палладия и платины). Особые группы составляют также элементы с застраиваемыми ^оболочками (лантаноиды и актиноиды).

Многие физические свойства элементов связаны с положением, которое они занимают в периодической системе. Так, атомные массы элементов возрастают с увеличением порядкового номера (исключение из этого правила составляют пары Ar—K, Co—Ni, Te—I): к магнитному упорядочению способны только металлы с незаполненными 3- и 4-й оболочками (исключением является твердый кислород), а сверхпроводящими свойствами в основном обладают парамагнитные переходные металлы четвертого — седьмого периодов; полупроводники располагаются в середине периодов в главных подгруппах П1, IV и VI. а полуметаллы — в главной подгруппе V; все периоды .заканчиваются диэлектрическими кристаллами. Отчетливую периодичность обнаруживают и другие физические свойства.

Для выявления закономерностей изменения физических свойств элементов удобно располагать их в «длинную» периодическую систему, в которой всем элемен-

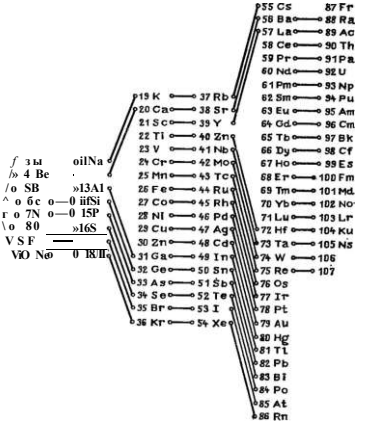


Рис. 46.1. «Длинная» периодическая система элементов

там, имеющим одинаковую структуру внешних электронных оболочек, отводится по отдельной группе [11. Длинную таблицу нередко изображают в компактной ступенчатой форме (рис. 46.1), располагая периоды один за другим симметрично относительно оси таблицы, и соединяя линиями элементы, принадлежащие к одной группе [2]. Другая форма длинной таблицы использована для построения периодической системы физических свойств элементов '(см, таблицу на форзаце), В этой таблице представлены атомные и термодинамические характеристики физических элементов в твердой кристаллической фазе при атмосферном давлении. Указан тип решетки, в которой элемент кристаллизуется при температуре 20 °С (для веществ, которые при нормальных условиях находятся в жидком или газообразном состоянии, указана фаза, в которую они переходят в результате охлаждения при атмосферном давлении). Приведены атомные и ионные радиусы (по Полингу) для основных валентностей элементов, а также температуры кипения, плавления, магнитных и сверхпроводящих переходов. Для немагнитных кристаллов указан тип магнитной восприимчивости (парамагнитная или диамагнитная). Приведены также значения температуры Дебая, определенные для большинства элементов из данных по теплоемкости при температуре 20 °С.

Диэлектрики, полупроводники, полуметаллы и металлы выделены соответственно шрифтом (светлый, штриховка, сетка и жирный).

Литературные источники, из которых взяты данные по температурам фазовых переходов, приведены в соответствующих разделах Справочника (см. гл. 12, 21, 27. 28) Значения температуры Дебая взяты в основном из обзора [3], а недостающие в нем данные — из [4]. Остальные характеристики элементов в кристаллической фазе приведены в соответствии с I5, 61.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lexikon der Physik: Bd 3. Stuttgart, 1969.
2. Handbuch der Physik. Bd 36, Springer Verlag,

i Cschneidner K- A. J. Sol. State Phys. 1964. Vol. 16. P. 275.

4. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. М.: Мир, 1979.

5. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1960—1969.

6. Энциклопедия неорганических материалов. Киев: Высшая школа, 1977.

мюон

Масса m_{μ} = 1,883 532 7(11)-10-28 кг = 0,113 428 913(17) а.е.м,

= 105,658 389(34) МэВ

Магнитный момент = 4,490 451 4(15)-10-^6 Дж-Тл"!

V^IV-N = 8,890 598 1(13)

Аномалия магнитного момента а^ = - 1 = 1,165 923 0(84). 10-е g-фактор,

= 2(1 + V = 2,002 331 846(17)

ПРОТОН

Масса mj, = 1,672 623 1(10).10-2' кг = 1,007 276 470(12) а.е.м.

прс^1[е] = 938,272 31(28) МэВ

Отношение массы протона к массе электрона т^/те = 1836,152 701(37)

Удельный заряд е/т^ = 9,578 830 9(29). 10' Кл-кр-^

Комптоновская длина волны = 1,321 410 02(12)-10-« м

Магнитный момент = 1,410 607 61(47)-10-2б Дж-Тл-г

Нр/Hjv = 2,792 847 386(63)

Поправка на диамагнитное экранирование для сферического образца H^O при 25 °С,

1 = 25,689(15). 10-8

Магнитный момент без поправки на диамагнетизм

1,410 571 38(47). 10-26 Дж.Тл"!

Гиромагнитное отношение YJ> = 26 752 212 8(81). 10* с-г-Тл"»

НЕЙТРОН

Масса т„ = 1,674 928 6(10)•Ю-^' кг = 1,008 664 904(14) а.е.м.

Отношение массы нейтрона к массе протона mjnip = 1,001 378 404(9)

Комптоновская длина волны = fc/(m„c) = 1,319 591 10(12).Ю-^^ ^

Магнитный момент* (д„ = 0,966 237 07(40). 10-^6 Дж.Тл"!

* Скалярная величина магнитного момента.

(iJUjV = 1,913 042 75(45)

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Авогадро постоянная N^ = 6,022 136 7(36).Ю^з моль->.

Атомная единица массы т„ = m(i2C)/12 = 1,660 540 2(10). 10-« кг

ти = с^1[е} = 931,494 32(98) МэВ

Атмосфера стандартная, 1 атм — 101 325 Па (точно)

Больцмана постоянная к = ***RIN***а = 1,380 658(12)-Ю-^з Дж.К-^

Излучение постоянная первая ci = 2nfec2 = 3,741 774 9(22).lO-i® Вт.м?

вторая cj = hclk = 0,014 387 69(12) м.К

Объем моля идеального газа при ***T*** = 273,15 **К** и р = 101 325 Па,

ут = ду/р = 22,414 10(19) л/моль

Стефана — Больцмана постоянная о = пЧ^КЪШЧ^) = 5,670 51(19).Ю"» Вт.м-«.К-«

Ускорение силы тяжести (стандартное) g_n = 9,806 65 м-с-^ (точно)

Универсальная газовая постоянная R = 8,314 510(70) Дж-моль-^-К'^

Фарадея постоянная ***F*** = ***N^e*** = 96 485,309(29) Кл.моль-1

Электрон-вольт {е}, 1 эВ = 1,602 177 33(49).Ю-^» Дж

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Скорость света в вакууме с = 299 792 458 м-с"' (точно)
Магнитная постоянная (Хо = 4я-10-'== 12,566 370 614-10-' Гн-м"! (точно)
Электрическая постоянная бо = 8,854 187 817-10-12 ф-м"! (точно)
Гравитационная постоянная ***G*** = 6,672 59(85).10-ii biS-Kr-i-c""
Планка постоянная ***h*** = 6,626 075 5(40)-Ю"»* Дж-с
Планковская масса (h d C f' = mp*^ = 2,176 71(14).10"" кг
длина ft/(mpjc) = fpj = 1,616 05(10)-lO-^S м
время fpj/c = fpj = 5,390 5 6 (3 4) - с

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Элементарный заряд е = 1,602 177 33(49)-Ю"" Кл
Квант магнитного потока Фо = Л/(2в) = 2,067 834 61(61)-10-l§ Вб
Джозефсона отношение 2e/fe = 4,835 976 7(14).10" Гц-В'^
Квант холловского сопротивления R^ = h/e^ = 25 812,805 6(12) Си
Бора магнетон (Xg = ***ehl(2m^)*** = 9,274 015 4(31).10-24 Дж-Тл-^
= 5,788 382 63(52). 10-5 эВ-Тл-»
Ядерный магнетон (Xjv = еП/{2тр) = 5,050 786 6(17).10"" Дж-Тл"!
(ijv/(e) = 3,152 451 66(28)-10-8 эВ-Тл"»

АТОМНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Тонкой структуры а = iioceV{2h) = 7,297 353 08(33)-IQ-s
а-1 = 137,035 989 5(61)
Ридберга постоянная ***R^*** = ***meca?l(2h)*** = 10 973 731,534(13) и"!
R^e = 3,289 841 949 9(39). 10" Гц
ЛооАс/1е) = 13,605 698 1(40) эВ
Бора радиус а^ = а/(4я7?^) = 0,529 177 249(24). 10-w м
Хартри энергия ***E^*** = ***2R^hc*** = 4,359 748 2(26). 10-^ Дж
= 27,211 396 1(81) эВ

ЭЛЕКТРОН

Масса те = 9,109 389 7(54).10-з1 кг = 5,485 799 03(13).10"* а.е.м.
mecV(e} = 0,510 999 06(15) МэВ
Удельный заряд — e/roe = -1,758 819 62(53). 10" Кл.кг-я
Молярная масса М^ = 5,485 799 03(13). 10"' кг/моль
Комитоновская длина волны = hl(m^) = 2,426 310 58(22).10-i« м
Классический радиус r^ = аЧ^ = 2,817 940 92(38).lO-i® м
Томсоновское сечение рассеяния а^ = (8я/3)г| = 0,665 246 16(18).lO'^s м?
Магнитный момент Це = 928,477 01(31)-10-^6 Дж.Тл'^
(ie/jiB = I'OOl 159 652 193(10)
Аномалия магнитного момента а^ = ц^/цв — 1 = 1,159 652 193(10).10-3 g-фактор,
ёе = 2(1 + а^) = 2,002 319 304